

Оценка метрологических характеристик различных типов ультразвуковых расходомеров на основе разработанной классификации

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Разработана и представлена общая классификация современных типов ультразвуковых расходомеров (УЗР), а также детально рассмотрены классификации по следующим признакам: по методу измерения расхода, по количеству измерительных каналов, по способу размещения пьезоэлектрических преобразователей, по виду акустического пути, по направленности излучения. На основании предложенной классификации проведена оценка метрологических характеристик ультразвуковых расходомеров различного типа. Описаны как достоинства, так и недостатки устройств разных схем и конструкций, а также существующих методов измерения. Сделаны выводы о перспективности схем и конструктивных исполнений УЗР в плане дальнейшего повышения точности и универсальности применения.

Ключевые слова: ультразвуковой расходомер, классификация расходомеров, метрологические характеристики, общая классификация расходомеров.

Введение

В настоящее время одними из наиболее прогрессивных приборов измерения расхода и количества жидкостей и газов являются расходомеры и счетчики с ультразвуковыми первичными преобразователями.

Приборы данного типа в полной мере удовлетворяют постоянно растущие требования к качественным свойствам расходомеров.

Ультразвуковые расходомеры (УЗР) имеют ряд важных преимуществ[1]:

- широкий динамический диапазон измерений;
- отсутствие потерь напора благодаря отсутствию элементов прибора в измерительном канале;
- отсутствие влияния на гидродинамику потока;
- отсутствие подвижных элементов и, как следствие, повышенная надежность;
- возможность измерения расхода нефтепродуктов, агрессивных, неэлектропроводных, непрозрачных и неоднородных жидкостей (суспензий, пульп), в том числе многокомпонентных сред;
- низкое энергопотребление;
- возможность монтажа без остановки технологического процесса (для накладных приборов);
- сохранение технико-эксплуатационных характеристик во времени.

В настоящее время существует множество всевозможных вариантов и схем ультразвуковых расходомеров и методов измерения расходов с их помощью [1–3].

Целью данной статьи является оценка потенциала дальнейшего развития и применения на практике различных вариантов и схем ультразвуковых расходомеров и методов измерения расходов с их помощью на основе предложенной классификации УЗР по различным конструктивным признакам. Проанализированы достоинства и недостатки различных типов конструктивного исполнения и обозначены оптимальные области их применения. Представлены выводы о перспективности схем и конструктивных исполнений УЗР в плане дальнейшего повышения точности и универсальности применения.

Классификация ультразвуковых расходомеров и методов измерения расхода с их помощью

1. Общая классификация ультразвуковых расходомеров

Метод измерения ультразвуковыми расходомерами основывается на соотношении скорости распространения акустических колебаний в неподвижной среде и скорости движения самой среды. Многообразие 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.

Ультразвуковые расходомеры можно классифицировать: по способу перемещения УЗ волны, положению УЗ луча относительно потока, способу размещения пьезопреобразователя, количеству измерительных каналов, направленности УЗ излучения, виду акустического пути [1,2]. Предлагаемая общая классификация УЗР приведена на рис. 1.

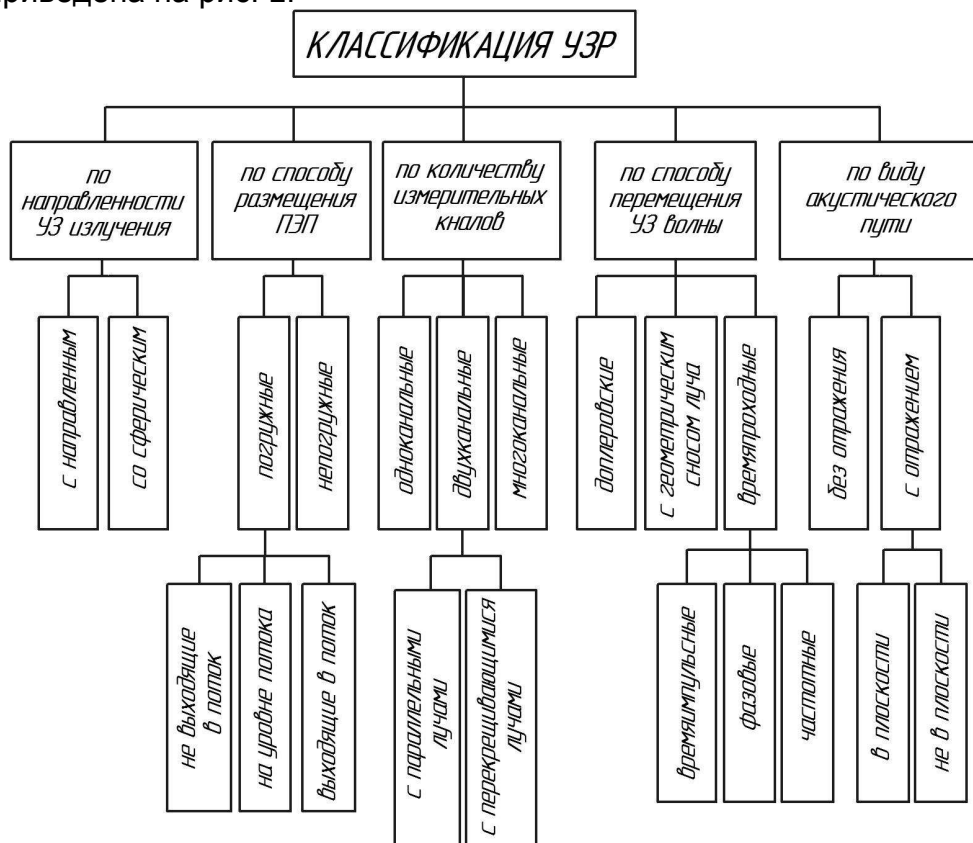


Рис. 1. Общая классификация ультразвуковых расходомеров

2. Классификация по методу измерения расхода

В настоящее время известны три метода (рис. 2) измерения расхода вещества с помощью ультразвука[1–4]:

1. Метод, основанный на разности скорости распространения ультразвуковых волн, направленных по потоку и против него (рис. 2, а). Зондирующий импульс в данном случае излучается поочередно парой

пьезоэлектрических приемопередатчиков по направлению потока и против него. Данный метод реализуется тремя измерительными принципами[5–7]:

1) *временной импульсный* – измеряется разность продолжительности прохождения коротких импульсов, которые направлены по потоку и против него (рис. 2, а):

$$\Delta\tau = \frac{2LQB}{c^2 \cdot (\sin\beta \cdot QB)^2}, \quad (1)$$

где L – путь ультразвукового луча;

Q – расход;

B – коэффициент, зависящий от параметров среды и трубопровода;

c – скорость ультразвука в измеряемой среде;

β – угол ввода ультразвукового луча ;

2) *фазовый* – измеряется разность фазовых сдвигов УЗ колебаний, которые направлены по потоку и против него:

$$\Delta\varphi = \omega \cdot \frac{2LQB}{c^2 \cdot (\sin\beta \cdot QB)^2}, \quad (2)$$

где ω – круговая частота ультразвуковых колебаний;

3) *частотный* – измеряется разность частот повторения коротких импульсов или пакетов УЗ колебаний, которые направлены по потоку и против него:

$$\Delta f = \frac{\sin\beta \cdot QB}{L}, \quad (1)$$

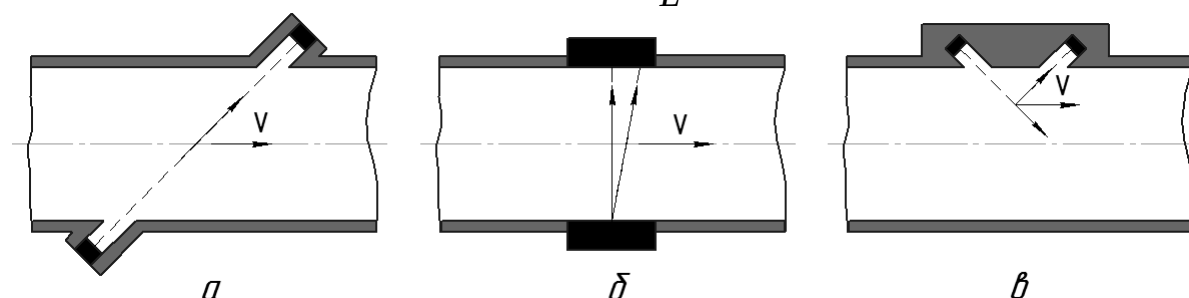


Рис. 2. Схемы измерения расхода с помощью УЗР для трех методов: а – *временной проходной метод №1*; б – *метод геометрического сноса луча №2*; в – *доплеровский метод №3*

2. Метод, основанный на геометрическом сносе ультразвуковой волны (с лучом перпендикулярным к потоку), обусловленном движением потока вещества (рис. 2, б). 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 применим 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.

3. Метод, основанный на доплеровском сдвиге частоты ультразвукового сигнала, отраженного от частиц измеряемого потока (рис. 2, в). 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:

$$\Delta f = \frac{f_1 \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}{c}, \quad (2)$$

где: f_1 – исходная частота ультразвуковых колебаний;

α_1 – угол между вектором скорости частицы отражателя и направлением исходного луча;

α_2 – угол между вектором скорости частицы отражателя и направлением отраженного луча.

Оценка метрологических характеристик:

1. Для высокоточных измерений расхода целесообразно применять метод, основанный на разности времен распространения ультразвуковых волн, направленных по потоку и против него.

2. Вследствие небольшой чувствительности, крутизны градуировочной характеристики невозможно получить высокую точность измерений методом геометрического сноса ультразвуковой волны.

3. Доплеровский метод наиболее широко применяется для измерения локальных скоростей, а в области измерения расхода имеет ограниченные возможности.

3. Классификация по направленности ультразвукового излучения

По направленности ультразвукового излучения расходомеры делятся на две категории:

- с направленным излучением – пара ПЭП поочередно излучает узконаправленные импульсы в сторону друг друга (рис. 3, а);
- с ненаправленным (сферическим) излучением – излучатель испускает широконаправленный импульс, адресованный сразу нескольким приемникам расположенным выше и ниже по потоку (рис. 3, б);

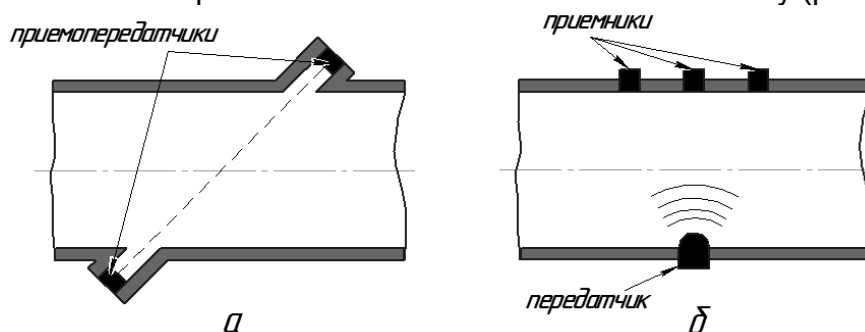


Рис. 3. Виды зондирующих импульсов:

а – направленный импульс; б – ненаправленный (сферический) импульс

Оценка метрологических характеристик:

1. Направленное излучение гораздо чаще применяется в промышленных образцах расходомеров. Это объясняется более простым алгоритмом вычислений скорости потока ввиду однозначности пути, проходимого зондирующим импульсом.

2. Схема со сферическим передатчиком в теории имеет ряд преимуществ: более простая конструкция ввиду наличия только одного излучателя и нескольких приемников; данная схема позволяет также производить одновременное измерение скорости прохождения импульса против и по потоку, что снижает чувствительность прибора к мелким колебаниям поля скоростей. Однако на практике подобная схема трудноосуществима из-за сложности создания передатчика с достаточно широким углом излучения и равномерным излучением во всех направлениях.

4. Классификация по количеству измерительных каналов

УЗ расходомеры разделяют также по количеству каналов измерения так называемых лучей:

- одноканальные (однолучевые) — имеют два пьезоэлемента, каждый из которых поочередно выполняет функции излучения и приема (рис. 4, а);
- двухканальные (двулучевые) — имеют два излучателя и два приемника, которые создают два независимых акустических канала (рис. 4, б, в); эти каналы расположены или параллельно, или перекрещиваются;
- многоканальные (многолучевые) — имеют больше двух каналов и применяются для измерения расхода деформированных потоков с целью достижения повышенной точности (рис. 4, г).

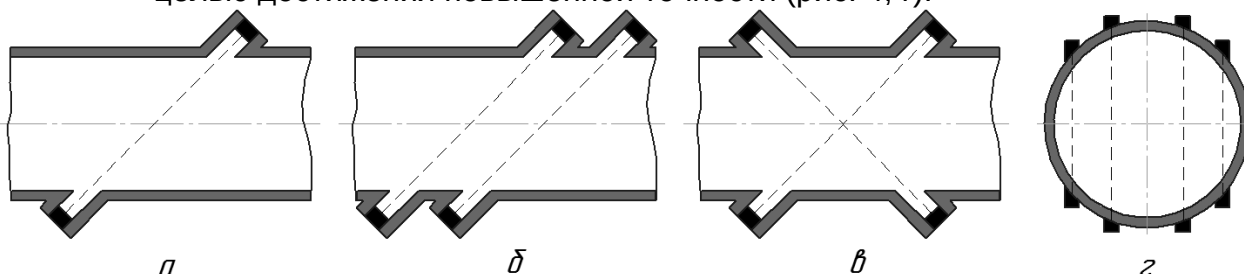


Рис. 4. Схема одноканального (а), двухканального с параллельными лучами (б), двухканального с перекрещивающимися лучами (в) и многоканального (г) УЗР

Оценка метрологических характеристик:

1. Одноканальные расходомеры применяют для измерения расхода газа с развитым профилем скорости и в случаях, когда не требуется высокой точности.

2. Двухканальные УЗР применяются, как правило, на трубопроводах малого и среднего диаметров, в случаях, когда точность одноканального расходомера является недостаточной.

3. Многоканальные расходомеры применяются в трубопроводах большого диаметра и в случаях, когда профиль потока существенно деформирован и искажен. Устройства характеризуются повышенной точностью измерений ввиду меньшей чувствительности к асимметрии потока, которая снижается с увеличением числа измерительных каналов. Современные промышленные образцы УЗР имеют до 8-ми измерительных каналов [8,9].

5. Классификация по виду акустического пути

По виду акустического пути расходомеры можно разделить на две категории:

- без отражения – зондирующий импульс излученный передатчиком проходит через поток измеряемой среды и достигает приемника (рис. 5, а);
- с отражением – зондирующий импульс, излученный передатчиком перед тем, как достигнуть приемника, один или более раз отражается от внутренней стенки измерительного тракта. Все отрезки пути зондирующего импульса могут лежать в одной плоскости (рис. 5, б) либо нет (рис. 5, в);

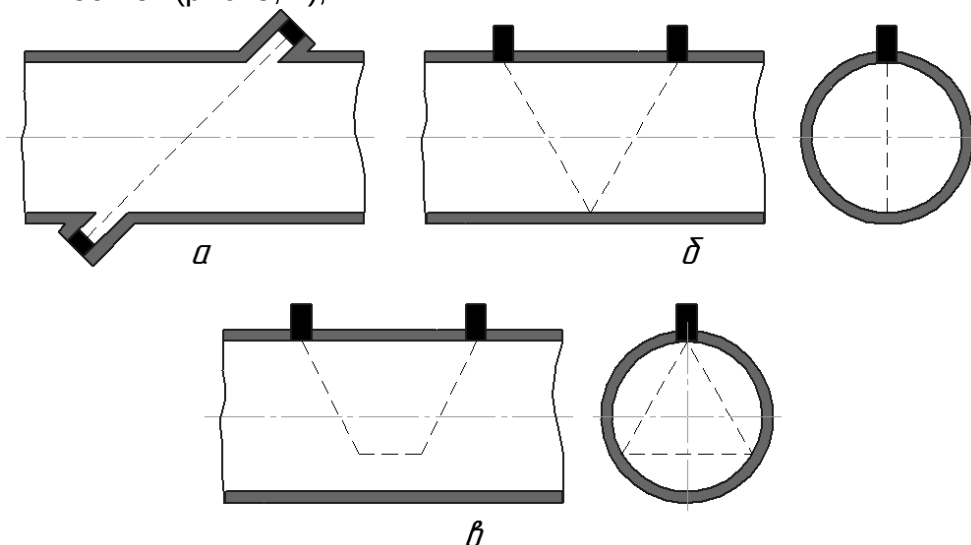


Рис. 5. Виды акустического пути: *а* – без отражения, *б* – с отражением в плоскости, *в* – с отражением не в плоскости

Оценка метрологических характеристик:

1. Преимуществом конструкции с акустическими путями без отражений является однозначность определения длины пути зондирующего импульса и, как следствие, более простой алгоритм вычислений скорости потока, а также меньшая чувствительность прибора к посторонним шумам.

2. Преимуществом приборов, в которых зондирующий импульс один или более раз отражается от внутренних стенок измерительного тракта, служит их меньшая чувствительность к мелким случайным пульсациям и неравномерностям поля скоростей потока. Недостатками являются чувствительность к посторонним шумам и усложненный алгоритм выделения полезного сигнала.

6. Классификация по способу размещения пьезоэлектрических преобразователей

По способам размещения пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) УЗ расходомеры разделяют на приборы:

- с погружными пьезоэлектрическими преобразователями (рис. 6, а) – ПЭП испускает зондирующий импульс непосредственно в измеряемую среду;
- с накладными пьезоэлектрическими преобразователями (расходомеры с преломлением) (рис. 6, б) – ПЭП устанавливается на стенку трубопровода, и зон-

дирующий импульс испускается в стенку трубопровода и попадает в измеряемую среду, проходя через стенку трубопровода.

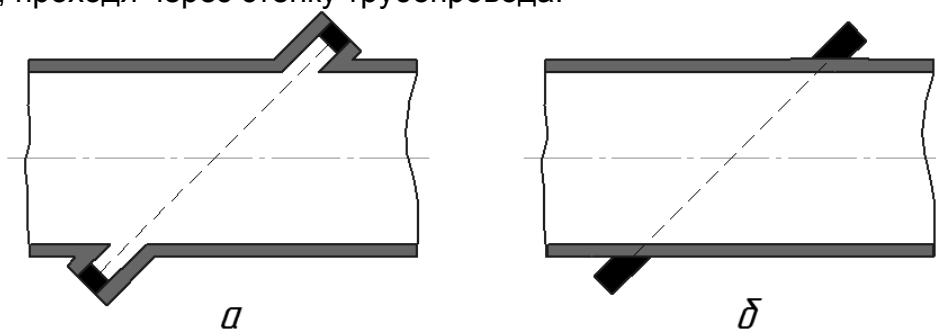


Рис. 6. Способы размещения ультразвуковых преобразователей: а – погружные ПЭП; б – непогружные (накладные) ПЭП

Оценка метрологических характеристик:

1. Наибольшую точность измерений обеспечивают УЗР с погружными преобразователями, т.к. при таком расположении между ПЭП наименьшее количество препятствий для распространения зондирующего импульса и возникает наименьшее количество посторонних шумов.

2. Устройства с непогружными ПЭП, как правило, применяются в случае так называемых переносных (накладных) УЗР. Данный тип приборов характеризуется простотой установки (не требует врезки в тело трубопровода), однако более низкой, в сравнении со стационарными УЗР, точностью.

Заключение

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.

На основании классификации и оценки метрологических характеристик, проведенных в данной статье, наиболее перспективными в плане дальнейшей работы по повышению точности измерений являются устройства, объединяющие в себе следующие качества:

- реализуют времяимпульсный измерительный принцип;
- имеют минимум 4 измерительных канала;
- имеют стационарные ПЭП «мокрого» типа, т.е. непосредственно выходящие в поток измеряемой среды.

В перспективе дальнейших исследований – изучение влияния различных факторов, таких как угол установки ПЭП, диаметр мерного участка, число Рейнольдса, наличие местных сопротивлений вблизи мерного участка и др. на точность показаний УЗР разных конструктивных исполнений и схем.

Список литературы

1. Коробко, И.В. Ультразвуковой метод измерения расхода и количества жидкостей и газов / И.В. Коробко, А.Н. Дидковская, П.К. Кузьменко // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2006. – №4. – С. 16-20.
2. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода // СТО Газпром 5.2-2005. – 2006.
3. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества / П.П. Кремлевский. — Л.: Машиностроение, 1989. — 701 с.
4. Морозов, В.Б. Сравнительные характеристики ультразвуковых расходомеров / В.Б. Морозов // Приборы и системы управления. – 1997. - №11. – с.19 – 24.
5. Табин, Д. Ультразвуковой метод измерения скорости потока, основанный на оценке разности интервалов времени распространения звука в разных направлениях / Д. Табин, // Контрольно-измерит. Техника. — 1989. — № 9. — С. 12-16.
6. Бергман, Л. Ультразвук. / Л. Бергман — М.: Изд-во иностр. лит., 1957. — 726 с.
7. Биргер, Г.И. Элементы общей теории ультразвуковых расходомеров / Г.И. Биргер // Измерит. техника. — 1961. — № 4. — С. 42–48.
8. Jackson, G.A. A three-path ultrasonic flowmeter with velocity profile identification / G.A. Jackson, J.R. Gibson, R. Holmes // Meas. Sci. Tehn. — 1991. — N 7. — P. 635-642.
9. Антонов, Н.Н. Многоканальный ультразвуковой расходомер / Н.Н. Антонов, Е.А. Борисевич, В.А. Решетников, А.Г. Сафин // Измерит. техника. — 1979. — № 10. — С. 43-44.
10. Киясбейли, А.Ш. Первичные преобразователи систем измерения расхода и количества жидкостей / А.Ш. Киясбейли, Л.М Лифшиц — М.: Энергия, 1978. — 704 с.
11. Гуртовцев, А.Л. Комплексная автоматизация учета и контроля электроэнергии и энергоносителей на промышленных предприятиях и их хозяйственных объектах / А.Л. Гуртовцев // Промышленная энергетика. — 2002. — № 8. — С. 7-14.
12. Филатов, В.И. Выбор типа преобразователя ультразвукового преобразователя / В.И. Филатов // Управление процессами при разработке и эксплуатации нефтяных месторождений. — Казань, 1974. — С. 141-144.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., С.И. Планковский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 20.09.2012

Оцінювання метрологічних характеристик різних типів ультразвукових витратомірів на підставі розробленої класифікації

Розроблено та подано загальну класифікацію сучасних типів ультразвукових витратомірів (УЗВ), також детально розглянуто класифікації за такими ознаками: за методом вимірювання витрат, за кількістю вимірювальних каналів, за способом розташування п'єзоелектричних перетворювачів, за видом акустичного шляху, за спрямованістю випромінювання. На підставі запропонованої класифікації проведено оцінювання метрологічних характеристик ультразвукових витратомірів різних типів. Описано як переваги, так і недоліки пристроїв різних схем і конструкцій, а також існуючих методів вимірювання. Зроблено висновки про перспективність схем і конструктивних виконань УЗВ у плані подальшого підвищення точності й універсальності застосування.

Ключові слова: ультразвуковий витратомір, класифікація витратомірів, метрологічні характеристики, загальна класифікація витратомірів.

Different ultrasonic flowmeter types' metrological characteristics evaluation based on the developed classification

The general classification of the modern types of ultrasonic flowmeters (UFM) was developed and presented, as well as discussed in detail classification by the following features: by flow measurement method, by number of channels, by piezoelectric transducers installation manner, by acoustic path configuration, by acoustic beam propagation direction. Based on the proposed classification the assessment of metrological characteristics of different types of ultrasonic flowmeters was done. Strengths and weaknesses of different schemes and designs of devices, as well as the existing methods of measurement were described. The conclusions about the prospects of schemes and designs of UFM in terms of further improving the accuracy and versatility were drawn.

Keywords: ultrasonic flowmeter, flowmeter classification, metrological characteristics, general classification of flowmeters.