

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

**Частотные и импульсные характеристики датчиков  
для ультразвуковых расходомеров газа**

АВТОРЕФЕРАТ  
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ  
Студента 4 курса 432 группы  
направления 03.03.02 «Физика»  
физического факультета  
Ховалева Александра Константиновича

Научный руководитель

Профессор,  
д.ф.-м.н., профессор \_\_\_\_\_ Петров В.В.

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Аникин В.М.

Саратов 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В связи с необходимостью организации коммерческого учета задача измерения расхода различных жидкостей с высокой точностью приобрела в последнее время большую актуальность. Существует большое многообразие приборов для измерения расхода. Однако наиболее эффективно данная задача решается с использованием ультразвуковых расходомеров с накладными датчиками, т. к., во-первых, не нарушается целостность трубопровода, а во вторых, в поток жидкости не вносится никакое препятствие. В настоящее время наибольшее распространение получили ультразвуковые расходомеры двух типов:

- расходомеры, в которых используется тот факт, что скорость распространения ультразвуковой волны  $C$  в движущейся среде является векторной суммой  $C = C_{ж} + V$ , где  $C_{ж}[1]$  — скорость распространения ультразвука в неподвижной жидкости, а  $V$  — скорость течения жидкости;

- расходомеры, основанные на эффекте Доплера, имеющем место при отражении ультразвуковой волны от некоторого отражателя или группы отражателей, движущихся в потоке жидкости.

Ультразвуковые времяимпульсные расходомеры в основном используются для измерения расхода «чистых» жидкостей, т. е. сред, содержащих сравнительно небольшое количество твердых и газовых включений. В случае же, если необходимо проводить измерение расхода неоднородных жидкостей, таких как сточные воды и пульпы, нужно использовать доплеровские расходомеры.

**Цель и основные задачи работы.** В настоящее время техника измерения расхода газа неплохо развита, но тем не менее применяемые методы не без изъянов, а к предлагаемым альтернативным методам специалисты на производстве относятся с осторожностью. Поэтому ставится

цель сравнить и проанализировать работу приборов, применяемых для задач измерения расхода (количества) газа на производстве.

В соответствии с целью поставлены следующие *задачи*:

- рассмотреть строение и принципы работы ультразвукового расходомера;
- изучить методы измерения расходов газа, а также провести сравнительный анализ;
- выяснить способы применения расходов газа на примере ультразвукового расходомера «ГиперФлоу-УС»;
  - провести измерения амплитудно-частотных характеристик четырехполюсников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** описаны характеристики ультразвуковых (УЗ) расходомеров, а также их устройство, классификация и принцип работы.

Ультразвуковые расходомеры – это приборы основанные на измерении зависящего от расхода эффекта, возникающего при проходе акустических колебаний через поток жидкости или газа.

Классификация расходомеров:

- **Фазовые** ультразвуковые расходомеры - это ультразвуковые расходомеры, работающие по принципу зависимости фазовых сдвигов ультразвуковых колебаний, образующихся на приемных пьезоэлементах, от разности временного прохождения колебаниями одинакового расстояния по потоку движущейся жидкости или газа и против потока.
- **Частотные** ультразвуковые расходомеры - это ультразвуковые расходомеры, работающие на принципе зависимости разности частот

повторяющихся коротких импульсов ультразвуковых колебаний от разности времен прохождения ультразвуковыми колебаниями одинакового пути по потоку жидкости (газа) и против потока.

- **Время-импульсные ультразвуковые расходомеры** - это ультразвуковые расходомеры, измеряющие разность времен прохождения коротких импульсов направлении потока жидкости или газа и против потока на расстоянии  $L$ .

- **Допплеровские ультразвуковые расходомеры** работают по принципу измерения, зависящего от расхода доплеровской разности частот, возникающих вследствие отражения акустических колебаний неоднородностями потока.

Метод основан на факте, что ультразвуковому сигналу, направленному против движения потока, для прохождения расстояния от излучателя до приемника требуется больше времени, чем сигналу, направленному по ходу движения потока. Были реализованы следующие принципы интерпретации сигнала:

**Фазовые** (фазовыми называют ультразвуковые расходомеры, основанные на зависимости фазовых сдвигов УЗ-колебаний, появляющихся на приемных пьезоэлементах);

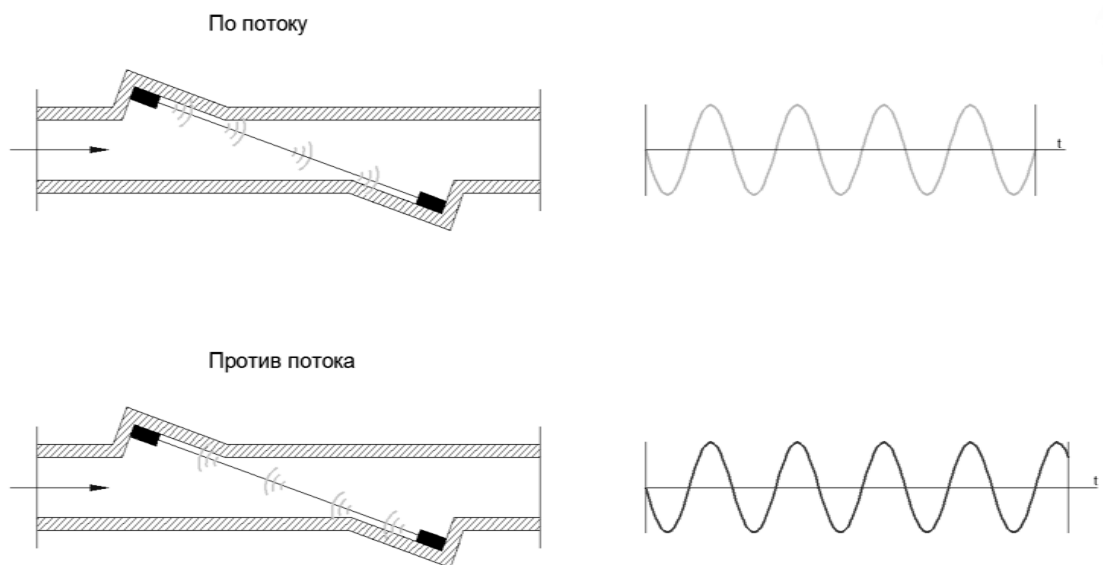


Рисунок 1 - Фазный принцип определения расхода

**Частотные** (суть их работы в следующем: синтезатор частоты подбирает такое значение частоты ультразвукового сигнала, чтобы по направлению потока укладывалось целое число волн ультразвуковых колебаний);

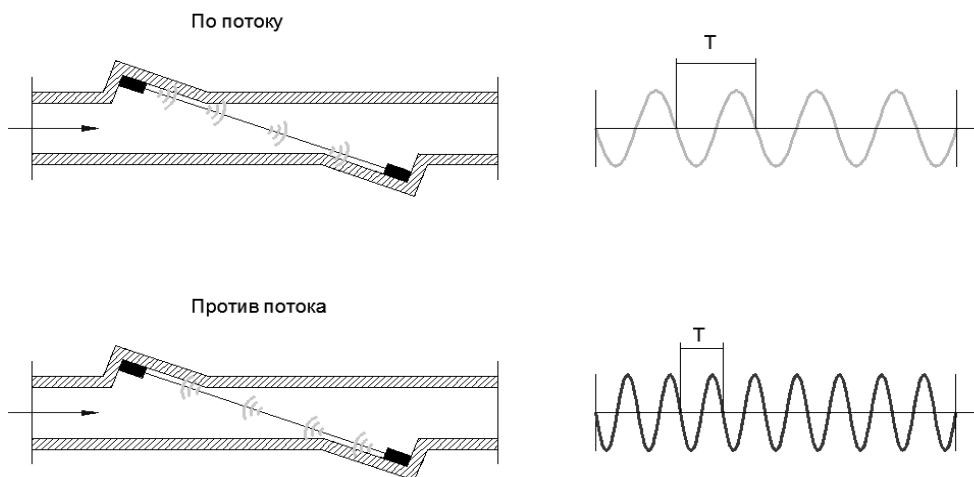


Рис.2 Частотный принцип определения расхода

**Время импульсные** (данные расходомеры отличаются от ранее рассмотренных тем, что в них не используются акустические колебания, направленные по потоку и против него. В данных расходомерах звуковые колебания направлены перпендикулярно потоку).

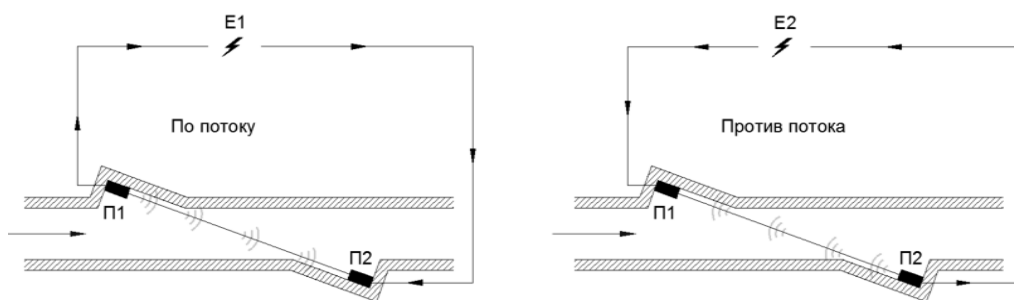


Рис.3 Время - импульсный принцип определения расхода газа

**Во второй главе** произведен сравнительный анализ методов и средств измерения расходов газа. Одним из самых распространенных методов измерения расхода является метод переменного перепада давления. Суть метода состоит в измерении перепада давления, до и после сужающего устройства, установленного в потоке газа.

Процесс измерения расхода описывается следующим уравнением:

$$Q = C \varepsilon F_0 \sqrt{2 \Delta p / \rho}, \quad (1) [10]$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент расширения, учитывающий увеличение удельного объема для газа;

$F_0 = (\pi \cdot d^2) / 4$  – площадь отверстия сужающего отверстия;

$\rho = (293,15 \rho_c) / (T + 273,15) \text{ К}$  – плотность;

$\Delta p$  – перепад, создаваемый сужающим устройством;

$E$  – коэффициент скорости входа, учитывающий влияние начальной скорости потока на образование коэффициента расхода  $\alpha$  ;

$\rho_c$  – плотность при стандартных условиях;

$p$  – абсолютное давление;

$T$  – температура;

$K$  – коэффициент сжимаемости;

$C$  – коэффициент истечения, представляющий собой отношение действительного расхода к теоретическому.

Произведение  $C \cdot E = \alpha$  называют коэффициентом расхода.

При проведении сравнительного анализа методов и средств измерения расходов газа, мной был сделан следующий *вывод*: сравнительный анализ средств измерения расхода и количества газа позволяет утверждать, что пока оптимальным способом измерения расхода и количества газа в газовой промышленности является метод переменного перепада давления.

**В третьей главе** рассмотрен способ измерения расхода газа на примере «ГиперФлоу-УС». Пьезоэлектрический датчик преобразует электрический импульс, поступающий с формирователя импульсов платы канальных приемопередатчиков, в ультразвуковые колебания. Прошедший через газовую среду ультразвуковой сигнал преобразуется другим датчиком в электрический сигнал и поступает на вход приемника сигналов платы канальных приемопередатчиков. Усиленный приемником сигнал преобразуется АЦП платы контроллера БЭ в цифровой код и записывается в память устройства управления. Электронный блок поочередно переключает

датчики (ДПЭ) каждого канала то на прием, то на передачу, в результате этого ультразвук попеременно проходит путь в газе по потоку и против потока газа. Записываемые при этом в память сигналы передаются вычислителю для последующей обработки и вычисления скорости потока и расхода в рабочих условиях эксплуатации на основании введенных в его память данных о диаметре трубопровода, расстоянии между ДПЭ и измеренном времени прохождения ультразвука в газе и средней скорости потока.

Информация от электронного блока передается в вычислитель, который выполняет конфигурирование электронного блока, вычисляет скорости потока газа, объемный расход в рабочих условиях и передает их во встроенную электронику комплексного датчика с вычислителем расхода «Гиперфлоу-3Пм». Кроме того, обеспечивается измерение температуры, давления газа и приведение расхода и количества к нормальным условиям, а также архивирование измеренных значений. Результаты измерений отображаются на индикаторе расходомера и передаются по токовому, частотному и цифровому каналам в другие системы.

**В четвертой главе** мы рассмотрим измерение амплитудно-частотных характеристик четырехполюсников.

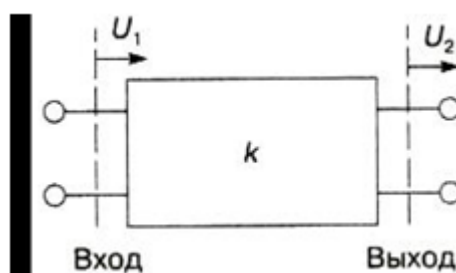


Рис.4 Схема четырехполюсника

Данный метод измерений амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) не требует специализированных приборов и достаточно точен. Его недостатком является низкая производительность. Поэтому он применяется сравнительно редко, однако представляет интерес с точки зрения методики

измерения. Процесс измерения состоит в последовательной установке различных частот синусоидального сигнала на входе исследуемого объекта, измерение входного и выходного сигналов и вычисление коэффициента передачи  $K(f) = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  для каждой частоты.

Практическая реализация данного метода требует определенного навыка измерений. Например, если, АЧХ имеет большие перепады (наличие режекторных или резонансных частот) надо быть внимательным при выборе входного сигнала. Может оказаться, что выбранный за исходный входной сигнал, окажется слишком малым на частотах режекции и выходной сигнал не может быть измерен вольтметром. Может случиться, что входной сигнал слишком велик и на частоте резонанса в исследуемом объекте возникнут нелинейные искажения, что приведет к «уплощению» АЧХ в месте ее подъема. Следует так же правильно выбрать шаг частот. Чем больше дискретность выбора, тем быстрее можно выполнить измерения, однако редкое расположение точек, на основе которых строится экспериментальная АЧХ на графике, тем больше вероятность потерять какие либо детали характеристики.

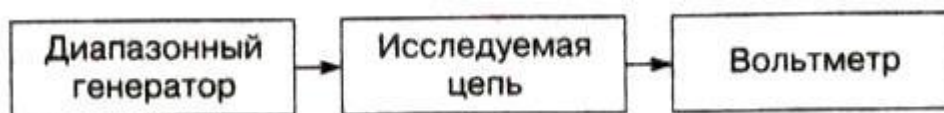


Рис.5 Структурная схема соединения приборов при снятии АЧХ четырехполюсника по точкам

Таким образом процесс трудоемок, требует многократного отсчета показаний трех приборов, выполнение расчетных операций и построение графика АЧХ ручным способом с графическим интерполированием. Из-за значительного времени, которое занимает измерительная процедура, возможны погрешности, связанные с изменением питающего напряжения и температуры. При настройке аппаратуры после изменения какого-либо элемента, процедуру измерений приходится повторять, что делает ремонтные и настроечные работы малопроизводительными. Поэтому возникла необходимость в автоматизации процесса измерения АЧХ.



В пятой главе в ходе практики, были рассмотрены измерения частотных и импульсных характеристик ультразвуковых датчиков для расходомера газа.

### Датчики с пьезоэлементами стержневого типа № 196.1068

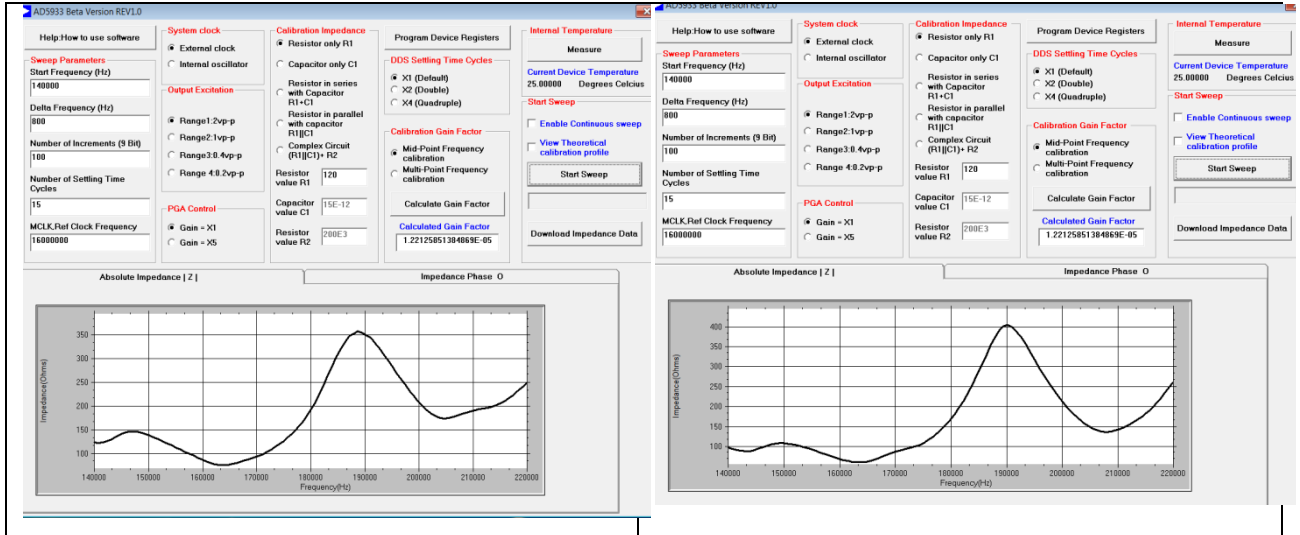


Рис. 6.1. Частотная характеристика датчика стержневого типа № 196.837. Резонансная частота 164 кГц, антирезонансная частота 188 кГц.

Рис. 6.2 Частотная характеристика датчика стержневого типа № 196.824. Резонансная частота 163 кГц, антирезонансная частота 190 кГц.

### Датчики мембранного типа

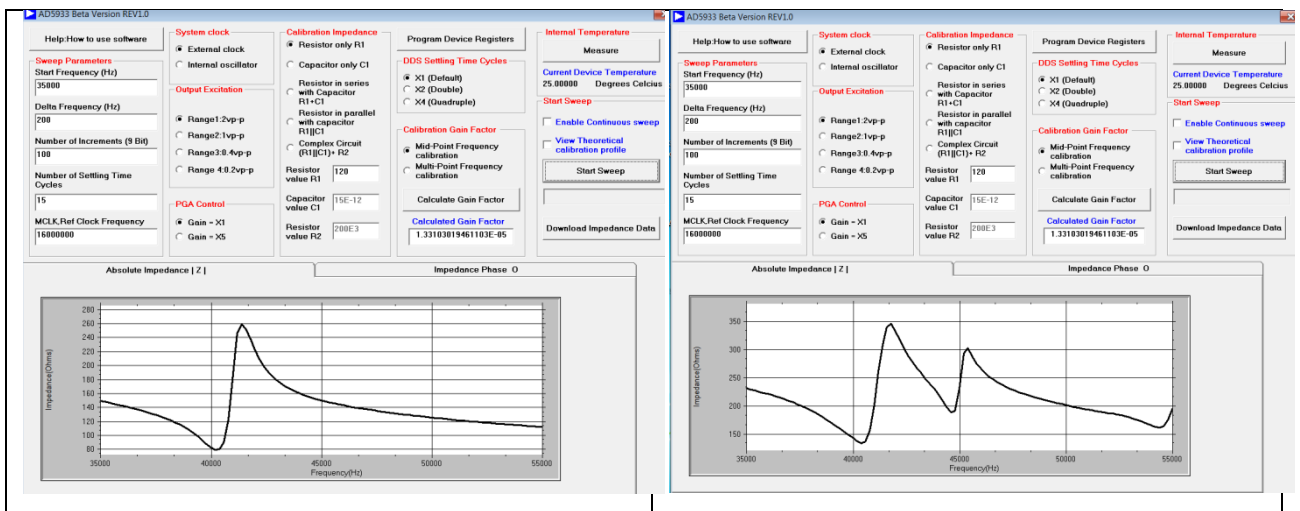


Рис. 7.1. Частотная характеристика датчика мембранного типа № 1 Резонансная частота 40,2 кГц, антирезонансная частота 42 кГц.

Рис. 7.2 Частотная характеристика датчика мембранного типа № 1 Резонансные частоты : f1 = 40,05; f2 = 44,6 кГц 40,2 кГц, антирезонансная частота 42 кГц.

Из анализа рисунков 6.1 - 7.2 следует, что частотные характеристики датчиков стержневого типа имеют более широкую относительную полосу частот в сравнении с датчиками мембранного типа, имеющими ярко выраженный острый резонанс. Такое свойство может быть объяснено наличием демпфирующих поглотителей в датчиках стержневого типа, снижающих паразитный «звон» вне частотной области работы датчика.

В датчиках мембранного типа острый резонанс обусловлен настройкой системы: пьезоэлемент – корпус на единую резонансную частоту. Неточность такой настройки может обусловить появление второго резонанса (как на рисунке 7.2), что оказывается нежелательным для правильной работы измерителя расхода.

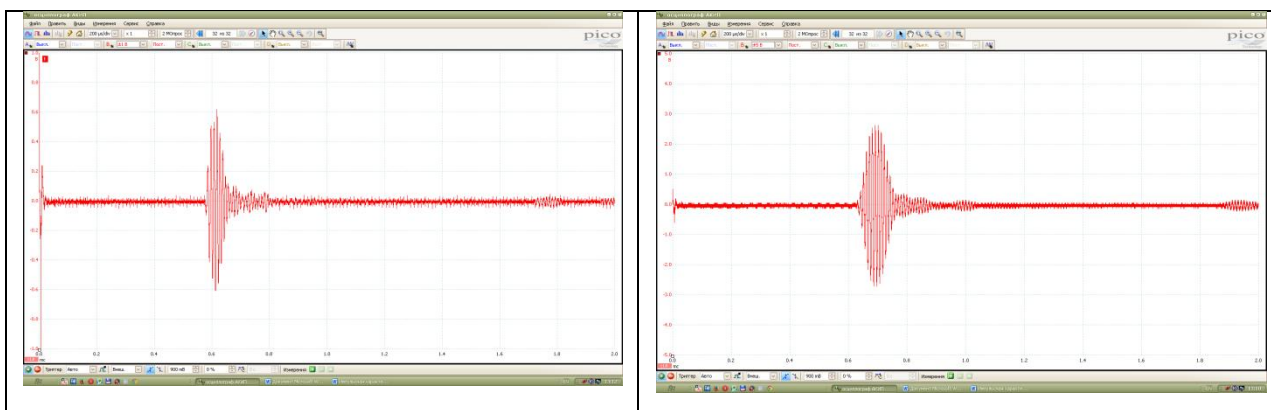


Рис. 8.1. Импульсная характеристика датчика №1 с центральной частотой 100 кГц.

Рис. 8.2. Импульсная характеристика датчика №2 с центральной частотой 100 кГц.

Полученные импульсные характеристики УЗ датчиков позволяют оценить уровень излучаемого и принимаемого ультразвукового сигнала. Анализируя форму импульса можно сделать вывод об ожидаемом временном разрешении при измерении разности времен прохождения УЗ сигнала от излучателя к приемнику и обратно в движущейся газовой среде. Например на рисунке 8.1 передний фронт импульса более крутой в сравнении с импульсом,, изображенном на рисунке 8.2. Это означает, что датчик № 1 позволят получить более высокое временное разрешение в сравнении с датчиком № 2.

## **Заключение**

В работе рассмотрены различные виды измерительных преобразователей расхода жидкости, их достоинства, недостатки, а также измерены частотные и импульсные характеристики ультразвуковых датчиков для таких расходомеров. Определение наиболее перспективного вида расходомера является сложной задачей, так как каждый из них обладает собственными достоинствами и недостатками.

В целом же следует отметить, что выбор конкретного типа расходомера следует осуществлять в соответствии со стоящими перед проектировщиком задачами.

## **Список использованной литературы**

1. Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. М.: Металлургия, 1964. - 382с.
2. А. В. Калиниченко, Н. В. Уваров, В. В. Дойников «Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике» И.: Инфра-Инженерия, 2008 г. - 256 с.
3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / Под общ. ред. Е. А. Шорникова. — 5-е изд., перераб. и доп. — СПб.: Политехника, 2004. — 412 с
4. А. В. Калиниченко, Н. В. Уваров, В. В. Дойников «Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике» И.: Инфра-Инженерия, 2008 г. - 183 с.
5. Трофимова Т.И. «Курс физики» М. 2001 г - 97 с.
6. Биргер Г.И., Бражников Н.И. Ультразвуковые расходомеры. М.: Металлургия, 1964. - 382с.
7. А. В. Калиниченко, Н. В. Уваров, В. В. Дойников «Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике» И.: Инфра-Инженерия, 2008 г. - 256 с.

8. Киясбейли А.Ш. "Частотно временные ультразвуковые расходомеры и счетчики" Москва, "Машиностроение", 1984 - 145 с.
9. Киясбейли А.Ш. "Частотно временные ультразвуковые расходомеры и счетчики" Москва, "Машиностроение", 1984
10. ГОСТ 8.563.1-97. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. – ИПК, Изд-во стандартов, 1998.
11. ГОСТ 8.586.1-5–2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007.
12. Деревягин А.М. Новый способ измерения расхода газа, реализованный в ультразвуковом расходомере «Гиперфлоу-УС» / А.М.Деревягин // Научно-технический отчет: ООО «НПФ «Вымпел». - Саратов, 2006. – 16 с.
13. Костылев В.В. Принципы построения многоканального ультразвукового расходомера // Совершенствование измерений расхода жидкостей, газов и пара: Материалы 12-й международной конференции. – СПб., 2002. – С. 119-123.
14. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. — М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2005. -15 с.
15. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств / Межгосударственный стандарт. — М., 2005. - 24 с.
16. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества — М.: Машиностроение, 1989. — С. 440-443.
17. Лепендин Л.Ф. Акустика. — М.: Высшая школа, 1978.