Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Высшая школа электроники и компьютерных наук Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор _____А.Л. Шестаков _____2020 г.

РАЗРАБОТКА ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА ГАЗА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА ЮУрГУ–12.03.01.2020.284. ВКР

Руководитель проекта, доцент кафедры ИнИТ _____ / А.А. Лысова _____ / 2020 г.

Автор проекта студент группы КЭ-414 _____ / Ю.В. Глухова _____ / 2020 г.

Нормоконтролер, доцент кафедры ИнИТ _____ / А.А. Лысова _____ / 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Глухова Ю.В. Разработка проточной части ультразвукового преобразователя расхода газа. — Челябинск: ЮУрГУ, КЭ–414, 97 с., 22 ил., библиогр. список — 28 наим., 4 прил.

В рамках выпускной квалификационной работы разработана проточная часть ультразвукого преобразователя расхода газа. Разработана математическая модель преобразователя, произведен вывод модели погрешностей и уравнения измерений. Проведен расчет основных элементов конструкции проточной части преобразователя расхода. Произведена разработка конструкции акустической камеры и мерного участка.

Моделирование и расчеты выполнены в прикладных пакетах PTC Mathcad, Ansys, SolidWorks, MS Excel. Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе оформлена в текстовом редакторе MS Word.

					ЮVpГV _ 12 03 01 2020 28/, ВКР				
Изм.	Личт	№_докум.	Подп.	Пата	103 pr 3 12.00.0		.204 8		
Разра	эб.	Глухова Ю.В.			Разработка проточной	Лит.	Лист	Листов	
Пров	3	Лысова А.А.					6	97	
							101/-		
Нконтр. преобразователя			ωγρ	ע וי					
Утв.	-	Лапин А.П.			расхода газа		Кафедра	а ИнИТ	

оглавление

ВВЕДЕНИЕ
1 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
РАСХОДА
1.1 Анализ технического задания
1.2 Обзор аналогов
1.3 Обзор патентов 14
1.4 Описание принципа действия ультразвуковых преобразователей расхода 15
2 ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА 17
2.1 Принципиальная схема преобразователя расхода 17
2.2 Функциональная схема преобразователя расхода 18
2.3 Уравнения измерения преобразователя расхода с точки зрения
принципиальной схемы 19
2.4 Уравнения измерения преобразователя расхода с точки зрения
функциональной схемы 24
2.5 Модели погрешностей и их анализ
З РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА
3.1 Акустическая камера: основные положения
3.2 Оценка чувствительности и диапазона измерения 40
3.3 Расчет конструкции проточной части преобразователя 45
4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
РАСХОДА
4.1 Акустическая камера 65
4.2 Мерный участок 67
4.3 Электронно-измерительный блок 67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 74
ПРИЛОЖЕНИЯ
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчет погрешности измерений преобразователя Ошибка! Зак.
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Расчет погрешности измерений преобразователя в
зависимости от угла излучения Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Преобразователь расходаОшибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акустическая камера Ошибка! Закладка не определена.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Лист

7

введение

В современной промышленности для управления техническими процессами необходимо контролировать расход различных жидкостей. Для этого достаточно часто используются ультразвуковые расходомеры. В основном, они применяются для измерения расхода неэлектропроводных жидкостей и, прежде всего, нефтепродуктов, а также для измерения агрессивных сред. В ряде случае ультразвуковой метод измерения расхода является практически единственно возможным.

Развитие методов бесконтактного измерения расхода жидкости и газа обладает высокой значимостью в сфере производства, поэтому вопросы о повышении точности измерений также имеют достаточную актуальность на сегодняшний день. Точность можно повысить различными способами, одним из которых является внесение изменений в конструкцию расходомера, в частности изменение угла, под которым устанавливается преобразователь относительно мерного участка.

Целью работы является разработка конструкции акустической камеры и мерного участка ультразвукового расходомера.

Задачами работы являются:

• описание принципа действия ультразвуковых преобразователей расхода;

• вывод математической модели преобразователя, вывод уравнения измерений, модели погрешностей и их анализ;

• расчет основных элементов конструкции проточной части преобразователя расхода;

• разработка конструкции проточной части преобразователя расхода.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Лист

8

1 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА

1.1 Анализ технического задания

Для разработки модели преобразователя рассмотрим его принципиальную схему и на ее основе составим математическую модель. Также, рассмотрев функциональную схему, составим на ее основе уравнение измерений преобразователя расхода.

Чтобы вывести модель погрешностей, необходимо проанализировать уравнения акустического канала с учетом геометрических и прочих параметров.

Для выполнения расчета конструкции акустической камеры, а также мерного участка, необходимо вычислить геометрические размеры вышеперечисленных узлов.

Для определения конструкции проточной части в соответствии с требованиями по максимальному давлению, условному диаметру и скорости необходимо воспользоваться:

• ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионно-стойкой стали. Технические условия;

• ГОСТ 33259-2015. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление до PN 250. Конструкция размеры и общие технические требования;

• ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.

1.2 Обзор аналогов

Прежде чем разрабатывать конструкцию проточной части, необходимо проанализировать рынок расходомеров со схожей конструкцией. Так аналогами стали следующие 3 отечественных и 2 зарубежных прибора:

- Ультразвуковой газовый расходомер ЭлМетро «ЭлМетро-Флоус (ДРУ)»;
- Ультразвуковой расходомер газа НПО Вымпел «Вымпел-500»;

						Лист
					ЮУрГУ — 12.03.01.2020.284 ВКР	0
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	1	У

• Ультразвуковой расходомер НПО Вымпел «Ввымпел-100»;

• Ультразвуковой расходомер-счетчик Endress-Hauser «Proline Prosonic Flow 92F»;

На рисунке 1 показан ультразвуковой газовый расходомер ЭлМетро «ЭлМетро-Флоус (ДРУ)».



Рисунок 1 – Ультразвуковой газовый расходомер «ЭлМетро-Флоус (ДРУ)»

Краткий перечень характеристик ультразвукового газового расходомера «ЭлМетро-Флоус (ДРУ)»:

- максимальная скорость потока 35 м/с;
- предельная погрешность от $\pm 0,5$ % до $\pm 2,0$ %;
- температура окружающей среды от -40 °C до +50 °C;
- давление в трубопроводе до 16 МПа [1].

Недостатком ультразвукового газового расходомера «ЭлМетро-Флоус (ДРУ)» является то, что электроакустические преобразователи, являющиеся частью измерительного устройства, находятся в контакте с измеряемым газом, что

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	10
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	7	10

неблагоприятно сказывается на точности измерений и сроке службы прибора. Помимо этого, наличие «карманов» в составе мерного участка преобразователя может привести к засорению, вихреобразованию и изменению профиля скоростей. Также схема действия данного прибора не исключает влияние изменений затухания ультразвука и делает невозможным измерение потока при скоростях, меньших 1 м/с, что сказывается на точности измерений.

На рисунке 2 показан ультразвуковой расходомер газа НПО Вымпел «Вымпел-500».



Рисунок 2 – Ультразвуковой расходомер газа «Вымпел-500»

Краткий перечень характеристик ультразвукового расходомера газа «Вымпел-500»:

- максимальная скорость потока 35 м/с;
- предельная погрешность от $\pm 0,3$ % до $\pm 2,0$ %;
- температура окружающей среды от -40 °C до +60 °C;
- давление в трубопроводе до 25 МПа [2].

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	11
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•	11

Недостатком ультразвукового расходомера газа «Вымпел-500», в первую очередь, являются большие габаритные размеры, связанные со стремлением к повышению точности измерений прибора и с резервным блоком измерительных введение более одного измерительного каналов. Однако канала вносит дополнительные погрешности, которые также необходимо учитывать при погрешности измерений. Также вычислении суммарной ЭТО влияет на уменьшение срока службы прибора, при котором расходомер будет сохранять заявленную точность измерений.

На рисунке 3 показан ультразвуковой расходомер газа НПО Вымпел «Вымпел-100».



Рисунок 3 – Ультразвуковой расходомер газа «Вымпел-100»

Краткий перечень характеристик ультразвукового расходомера газа «Вымпел-100»:

• максимальная скорость потока 30 м/с;

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	12
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	12

- предельная погрешность ±1,0 %;
- температура окружающей среды от -40 °C до +60 °C;
- давление в трубопроводе до 10 МПа [3].

Как и в предыдущем случае, недостатком ультразвукового расходомера газа «Вымпел-100» являются большие габаритные размеры, а также использование более одного измерительного канала, что приводит к появлению дополнительных погрешностей и уменьшению сроков эксплуатации прибора.

На рисунке 4 показан ультразвуковой расходомер-счетчик Endress-Hauser «Proline Prosonic Flow 92F».



Рисунок 4 – Ультразвуковой расходомер «Proline Prosonic Flow 92F»

Краткий перечень характеристик ультразвукового расходомера «Proline Prosonic Flow 92F»:

- предельная погрешность от $\pm 0,3$ % до $\pm 0,5$ %;
- температура окружающей среды от -40 °C до +60 °C;
- давление в трубопроводе до 25 МПа [4].

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	12
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	13

Как и в ранее рассмотренных расходомерах, недостатком ультразвукового расходомера «Proline Prosonic Flow 92F» является наличие более одного измерительного канала, что ведет к увеличению неточности измерений и уменьшению срока службы прибора. Также схема действия данного прибора не исключает влияние изменений затухания ультразвука и делает невозможным измерение потока при скоростях, меньших 1 м/с, что сказывается на точности измерений.

1.3 Обзор патентов

G01F1/66 Измерение объема или массы жидкостей, газов или сыпучих тел путем пропускания их через измерительные устройства непрерывным потоком: фазового измерением частоты, времени распространения сдвига, электромагнитных или других волн, например ультразвуковые расходомеры. Ледовский Сергей Дмитриевич (RU). Автор: Номер патента 2502054. Изобретение создано для выравнивания скорости потока, с целью улучшить качество измерения. На участке измерения находится специальный фрагмент с конфузором на входе и диффузором на выходе [5].

На рисунке 5 показано изображение продольного сечения расходомера из вышеуказанного патента.



Рисунок 5 – Изображение продольного сечения расходомера из патента РФ №2012115330/28, 17.04.2012

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист 14 Основным недостатком изобретения является то, что данный прибор устанавливается внутри среды, что приводит к изменению процессов, происходящих внутри нее и, соответственно, получению неточных результатов измерений. Также необходимо отметить, что непосредственный контакт измерительных преобразователей со средой негативно скажется на сроке службы прибора и точности измерений.

1.4 Описание принципа действия ультразвуковых преобразователей расхода

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на том, что при распространении ультразвуковых колебаний в движущейся измеряемой среде скорость ультразвука относительно неподвижной системы координат (стенок трубопровода) равна векторной сумме скорости ультразвука относительно среды и скорости самой среды относительно трубопровода.

Например, в трубопроводе установлены два излучающих пьезоэлемента, один из которых излучает ультразвуковую волну, по направлению потока, а другой – против него, и соответственно два приемных пьезоэлемента, расположенных на одинаковых расстояниях от излучателей. Эти пары излучающих и приемных пьезоэлементов образуют два акустических канала. При неподвижной жидкости волновая длина обоих каналов одинакова, но при движении жидкости в трубопроводе между принятыми сигналами каналов образуется волновая разность, которая однозначно зависит от скорости жидкости.

Два акустических канала можно также осуществить посредством одной пары пьезоэлементов, в каждом из которых излучение и прием ультразвука происходит попеременно.

Ультразвуковой расходомер может быть осуществлен и тогда, когда направление излучения волны перпендикулярно скорости потока, в этом случае измеряется геометрический снос волны, обусловленный движением потока среды.

	Ультразвуковые расходомеры состоят из двух частей:								
						Лист			
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	15			

• измерительного преобразователя (датчика) или просто преобразователя, в который входят пьезоэлементы, звукопроводы, участок трубопровода с измеряемой средой и вспомогательные конструктивные элементы;

• электронной схемы, в которую входят источники питания, генератор электрических колебаний высокой частоты, подаваемых на пьезоэлемент, различные узлы измерительной схемы, показывающие и регистрирующие приборы.

Существенной частью преобразователя являются звукопроводы, которые выполняют ряд функций:

• защиты пьезоэлементов от соприкосновения с измеряемой средой;

 передачи ультразвуковых колебаний от пьезоэлементов в измеряемую среду и обратно;

 изменения акустических характеристик преобразователя в целом, в том числе в некоторых случаях обеспечения автоматической акустической компенсации температурных погрешностей;

• конструктивного оформления некоторых типов преобразователей.

Звукопроводы, толщина которых не превышает нескольких длин волн ультразвуковых колебаний, а поверхности представляют собой параллельные плоскости, называются мембранами. Другие звукопроводы могут иметь произвольные размеры и форму. В качестве звукопроводов также могут быть использованы стенки трубопроводов и слои жидкости [6].

Выводы по разделу один: после анализа технического задания необходимо выбрать конструкцию проточной части преобразователя для дальнейшего проектирования. В рассмотренных аналогах и патентах выявлены значительные недостатки, решение которых ляжет в основу дальнейших расчетов и конструирования. Изучен основной принцип действия ультразвуковых преобразователей расхода и их основные элементы.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Лата

лист 16

2 ВЫВОД МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА

2.1 Принципиальная схема преобразователя расхода

В большинстве случаев ультразвуковой расходомер предназначен ДЛЯ измерения расхода загрязненных, как правило, агрессивных жидкостей и пульп. В СВЯЗИ С ЭТИМ поверхность пьезоэлементов должны быть защищена OT посредством соприкосновения с измеряемой средой промежуточных звукопроводов. Кроме того, недопустимо наличие каких-либо выступов, изгибов или карманов внутренней поверхности. Для соблюдения данных требований, как правило, применяются бесконтактные преобразователи.

В бесконтактных преобразователях ультразвук может быть введен в измеряемую среду только под углом, не равным прямому, к направлению потока и он должен преломляться на поверхности раздела между звукопроводом и средой. Следовательно, бесконтактные преобразователи могут быть выполнены только с преломлением.

Типичная модификация преобразователя с одной преломляющей поверхностью схематически представлена на рисунке 6 [6].



Рисунок 6 – Схема преобразователя с одной преломляющей поверхностью

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

Лист 17

2.2 Функциональная схема преобразователя расхода

Функциональные особенности схем преобразователей расхода рассмотрим на примере преобразователей, работа которых основана на измерении разности фаз между ультразвуковыми колебаниями, проходящими по потоку измеряемой среды и против него.

Непрерывные ультразвуковые колебания через звукопроводы синфазно вводятся в измеряемую среду по направлению потока и против него. Ультразвуковые волны, пройдя через среду и звукопроводы, попадают на приемные пьезоэлементы с некоторой разностью фаз $\Delta \varphi$, зависящей от средней асимметрии каналов. Составляющая разности скорости потока И фаз, пропорциональная скорости потока, измеряется при помощи соответствующей электронной схемы и является мерой расхода измеряемой среды.

На рисунке 7 рассмотрим типичную блок-схему ультразвукового расходомера по одноканальной фазовой схеме с попеременной коммутацией.



Генератор Г вырабатывает непрерывные электрические колебания высокой частоты, которые через модуляторы М1 и М2 подаются на пьезоэлементы П1 и П2. Коммутирующее устройство КУ управляет модуляторами, работа которых состоит в попеременном отпирании и запирании соответствующих каналов. Таким образом, пакеты колебаний высокой частоты попеременно подаются на каждый пьезоэлемент и преобразуются в нем в пакеты ультразвуковых колебаний, которые через звукопроводы направляются в измеряемую среду. Принятые ультразвуковые колебания подаются на фазометры ФМ1 и ФМ2, работой которых управляет коммутирующее устройство КУ в противотакте с подачей колебаний с генератора. Таким образом, каждый пьезоэлемент поочередно подключается через модулятор либо к генератору, либо к фазометру. В каждом фазометре принятые колебания сравниваются по фазе с опорным напряжением, в качестве которого используется напряжение с генератора. Сигналы фазометров подаются на сумматор С, в котором вырабатывается напряжение постоянного тока, пропорциональное разности фаз между принятыми колебаниями в обоих каналах. Это напряжение подается на регистрирующий прибор РП [6].

2.3 Уравнения измерения преобразователя расхода с точки зрения принципиальной схемы

Основной задачей аналитического исследования каждого типа ультразвукового расходомера является получение формулы, выражающей зависимость между скоростью потока и одним из параметров высокочастотного электрического сигнала, преобразованного приемным пьезоэлементом ИЗ ультразвукового сигнала после его прохождения через поток измеряемой жидкости.

В качестве такого параметра используется фаза синусоидального напряжения в двухканальных и одноканальных схемах. Этот параметр определяется временем распространения ультразвуковой волны в акустическом измерительном преобразователе.

Изм	Лист	Νο συκλω	Подпись	Лата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

При проведении исследований следует также выявить те физические закономерности и характерные особенности распространения ультразвукового сигнала, которое оказывает прямое или косвенное влияние на метрологические свойства ультразвукового расходомера. Изучение этих особенностей позволяет правильно определить аналитические выражения для основных видов погрешностей.

Распространение ультразвукового луча в трубопроводе при наличии потока имеет ряд особенностей, которые необходимо рассмотреть прежде, чем перейти к изложению методов аналитического исследования ультразвуковых расходомеров. Данное исследование проведем на основе принципиальной схемы преобразователя с одной преломляющей поверхностью, представленной выше на рисунке 6.

Промышленные потоки в большинстве своем турбулентны, и для них скорость в точке, отстоящей на расстоянии ρ от оси цилиндрического трубопровода радиусом *R*, определяется выражением:

$$v_{\rho} = v_1 + v_2 \cdot \ln\left(1 - \frac{\rho}{R}\right). \tag{1}$$

Первая составляющая v_1 формулы (1) представляет собой максимальную скорость потока $v_{\text{макс}}$ на оси трубопровода. Вторая составляющая зависит не только от ρ , но и от коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода λ . Величина v_2 описывается выражением:

$$v_2 = 1,25 \cdot v \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{2}}.$$
 (2)

Изм.	Лист	№ док∨м	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 20 Выразим $v_1 = v_{\text{макс}}$ через среднюю скорость потока v, для чего проинтегрируем выражение (2) по площади поперечного сечения $S = \pi R^2$, взяв в качестве элемента площади dS кольцо радиусом ρ и шириной $d\rho$:

$$v = \int_{0}^{R} \left(v_1 + v_2 \cdot \ln\left(1 - \frac{\rho}{R}\right) \right) \frac{2\pi\rho d\rho}{\pi R^2}.$$
(3)

Решая уравнение (3) относительно v_1 с учетом выражения (2), получим:

$$v_1 = v \cdot \left(1 + 1,875 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{2}}\right).$$

Тогда скорость потока v_{ρ} в любой точке поперечного сечения трубопровода будет определяться выражением:

$$v_{\rho} = \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \cdot \left(1,875 + 1,25 \cdot \ln\left(1 - \frac{\rho}{R}\right)\right)\right) \cdot v \,. \tag{4}$$

В формуле (4) неизвестным остается коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода *λ*. Гидравлическим сопротивлением называют потери удельной энергии при переходе ее в теплоту, вызванные вязким трением на участках гидравлических систем [7].

Коэффициент гидравлического сопротивления зависит от характера течения – ламинарного или турбулентного, поэтому оценочным параметром будет являться число Рейнольдса *Re*:

• для ламинарного течения и *Re* < 2300:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	21
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		21

$$\lambda = \frac{64}{Re};$$

• для ламинарных течений:

$$\lambda = \frac{75}{Re};$$

• для турбулентных течений:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

Число Рейнольдса *Re* можно найти по формуле:

$$Re = \frac{QD_{\Gamma}}{v \cdot A},$$

где Q – расход, м³/ч;

 $D_{\rm r}$ – гидравлический диаметр трубы, для труб круглого сечения $D_{\rm r} = D$, м;

v – скорость потока, м/с;

А – площадь поперечного сечения, м².

При оценке времени прохождения ультразвуковой волны, в основном, используют метод с допущениями, а для доказательства правомерности его использования на практике проводят расчет по строгому методу без допущений.

Метод с допущениями предполагает 3 следующих допущения:

1. Скорость потока принимается равномерно распределенной по сечению и равной средней скорости *v*, а для учета распределения скоростей потока вводится гидродинамическая поправка В_г:

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 22

$$B_{\rm r}=1+0,625\sqrt{\frac{\lambda}{2}}.$$

2. Не учитывается криволинейность траектории и изменение направления распространения ультразвукового луча в движущейся жидкости.

3. Кривизна преломляющих поверхностей в акустическом преобразователе не учитывается и соответственно рассматривается не весь пучок излученных лучей, а только центральный луч.

Принимая указанные допущения, полные времена распространения ультразвукового луча в симметричных каналах преобразователя можно записать в виде:

по потоку:

$$\tau_{+\nu} = \frac{2R}{(c_2 + \nu \cdot \sin\beta) \cdot \cos\beta} + 2\frac{H_0 - R}{c_1 \cdot \cos\alpha};$$
(5)

• против потока:

$$\tau_{-\nu} = \frac{2R}{(c_2 - \nu \cdot \sin\beta) \cdot \cos\beta} + 2\frac{H_0 - R}{c_1 \cdot \cos\alpha}.$$
 (6)

Учитывая выражения (5) и (6), получим разность времен $\Delta \tau$:

$$\Delta \tau = \frac{4R \cdot tg\beta}{c_2^2 - (v \cdot \sin\beta)^2} \cdot v \cdot B_{\Gamma}.$$
(7)

Проверим выражения (5), (6) и (7) более строгим методом. Исключая допущения, получим полные времена распространения ультразвукового луча:

• по потоку:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	22
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•	23

$$\tau_{+\nu} = \frac{2R}{c_2 \cdot \cos\beta} + 2\frac{H_0 - R}{c_1 \cdot \cos\alpha} - \frac{2R \cdot tg\beta}{c_2^2} \cdot \nu \cdot B_{\Gamma}; \qquad (8)$$

• против потока:

$$\tau_{-\nu} = \frac{2R}{c_2 \cdot \cos\beta} + 2\frac{H_0 - R}{c_1 \cdot \cos\alpha} + \frac{2R \cdot tg\beta}{c_2^2} \cdot \nu \cdot B_{\Gamma}.$$
(9)

Учитывая выражения (8) и (9), получим разность времен $\Delta \tau$:

$$\Delta \tau = \frac{4R \cdot tg\beta}{c_2^2} \cdot \nu \cdot \mathbf{B}_{\Gamma} \,. \tag{10}$$

Сравнение $\Delta \tau$ по выражениям (7) и (10), полученным двумя методами, показывает их идентичность, так как величиной $(v \cdot sin(\beta))^2$ пренебрегают по причине того, что она мала по сравнению с c_2^2 . Строго аналитическое исследование связано с большими математическими трудностями, но, как показывает сравнение, учет кривизны преломляющих поверхностей особо не увеличивает погрешности [6].

2.4 Уравнения измерения преобразователя расхода с точки зрения функциональной схемы

Для выведения формул одноканальных фазовых схем рассмотрим функциональную схему преобразователя расхода, представленную выше на рисунке 7, с учетом тех факторов, которые определяют фазовые сдвиги, обусловленные асимметрией параметров преобразователя.

При изменениях температуры или состава возможна различная скорость ультразвука в двух последовательных тактах коммутации, что эквивалентно асимметрии между каналами. Также оба пьезоэлемента не могут быть

					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР			
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата				

установлены под одинаковым углом *α* к оси трубопровода, что вызывает асимметрию углов между каналами.

Таким образом, полная формула одноканальной фазовой схемы с преломлением имеет следующий вид:

$$\begin{split} \Delta \varphi &= \omega \cdot \left(\frac{2D \sin\alpha}{c_1 c_2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}} v + \frac{D}{c_2^2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}} \delta c_2 + \frac{l}{c_1^2} \delta c_1 + \right. \\ &+ \frac{nD \sin 2\alpha}{2c_1 \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^3}} \delta_0 \alpha \right) + \delta \varphi_{\text{рев}} + \delta \varphi_{\text{гидр}} + \delta \varphi_{\text{эл}} \,, \end{split}$$
(11)

где ω – частота ультразвуковых колебаний, рад/с;

D – диаметр трубопровода, м;

n – показатель преломления измеряемой среды относительно материала звукопроводов;

l – длина звукопровода, м;

*δ*c₂ – разность флуктуаций скорости ультразвука в измеряемой среде между каналами преобразователя, м/с;

*δ*c₁ – разность флуктуаций скорости ультразвука в материале звукопроводов между каналами преобразователя, м/с;

δ₀α – асимметрия углов между соответствующими ультразвуковыми лучами и нормалями к оси трубопровода, рад;

 $\delta \varphi_{\rm peg}$ — разность неконтролируемых сдвигов фаз, обусловленных реверберацией ультразвуковых волн, рад;

 $\delta \varphi_{\rm гидр}$ – разность неконтролируемых сдвигов фаз, обусловленных отклонением гидродинамических характеристик потока от расчетных, рад;

 $\delta \varphi_{_{3Л}}$ – разность неконтролируемых сдвигов фаз и погрешностей измерения в электронной схеме прибора, рад.

В формуле (11) первый член в скобке определяет сдвиг фазы, обусловленный движением жидкости в трубопроводе, следующие два – сдвиг, обусловленный

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	25
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	23

разностями вариаций скорости ультразвука в измеряемой жидкости и материале звукопроводов, а остальные члены – сдвиг, обусловленный асимметрией отдельных параметров преобразователя, который не поддается точному аналитическому расчету.

Скорость ультразвука в измеряемой среде практически зависит от температуры *t* и состава *q*, а в материале звукопроводов – только от температуры. Зависимость же скорости ультразвука от давления незначительна, поэтому ею можно пренебречь. Скорость ультразвука является нелинейной функцией температуры и концентрации, но при небольших изменениях этих величин можно принять линейную аппроксимацию:

$$c_1 = c_{1_0}(1+b_1t); c_2 = c_{2_0}(1+b_2t+a_2q).$$
 (12)

Показатель преломления измеряемой среды относительно материала звукопроводов приближенно можно представить в виде [2]:

$$n = \frac{c_2}{c_1} \approx n_0 (1 + b_3 t + a_2 q), \tag{13}$$

где

$$n_0 = \frac{c_{2_0}}{c_{1_0}}; \ b_3 = b_2 - b_1$$

2.5 Модели погрешностей и их анализ

Рассмотрение полных формул ультразвуковых расходомеров показывает, что погрешности в них различны не только по происхождению, но и по характеру.

При изменении скорости ультразвука в измеряемой среде вследствие отклонений температуры Δt или концентрации Δq от номинальных значений

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	26
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	20

появляются погрешности, величина которых пропорциональна измеряемой скорости потока или расходу. Погрешности этого вида, появляющиеся только при движении среды, называются чистотемпературными и чистоконцентрационными.

Температурные и концентрационные погрешности другого типа появляются в результате того, что параметры электронно-акустических каналов не являются симметричными и во время работы не остаются неизменными. Рассматривая междуканальную асимметрию любого параметра, можно выделить в ней постоянную составляющую (начальную асимметрию) и неконтролируемую разность вариаций соответствующего параметра. Начальная асимметрия вызывает сдвиг нуля прибора, т.е. некоторое начальное показание при неподвижной жидкости. Это показание можно скомпенсировать, однако при изменении скорости ультразвука в измеряемой среде и материале звукопроводов наличие компенсации преобразователя приведет к появлению погрешностей, которые не зависят от скорости потока. Такие погрешности называют дополнительными температурными или концентрационными. Они имеют чисто акустическое происхождение и являются особенностью ультразвуковых расходомеров.

Неконтролируемые разности вариаций параметров также порождают погрешности, не зависящие от скорости потока и появляющиеся в виде дрейфа нуля прибора.

Также особенностью ультразвуковых расходомеров является возможность появления реверберационных погрешностей, связанных с отраженными от приемника и излучателя колебаниями.

погрешностей, Наконец. отметить наличие связанных нужно С Для гидродинамическими характеристиками потока. учета ИХ вводят соответствующую поправку при градуировке прибора, но если же фактический профиль скоростей отличается от расчетного, то появляются погрешности данного типа.

Таким образом основными видами погрешностей в ультразвуковых расходомерах являются следующие:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	27
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		27

1. Чистотемпературные и чистоконцентрационные

2. Дополнительные температурные и концентрационные

3. Обычные, обусловленные неконтролируемыми вариациями параметров преобразователя и электронной схемы

4. Реверберационные

5. Гидродинамические.

Для анализа моделей основных видов погрешностей получим для них полные аналитические выражения.

Полное аналитическое выражение для температурной погрешности найдем, продифференцировав уравнение (11) по *t* с учетом уравнений (12) и (13):

$$\delta \varphi_{t} = \omega \cdot \left(\frac{2D[b_{1} + b_{2}(1 - 2n^{2}sin^{2}\alpha)]sin\alpha}{c_{1}c_{2}\sqrt{(1 - n^{2}sin^{2}\alpha)^{3}}}v + \frac{D[(b_{3} - b_{1})(1 - n^{2}sin^{2}\alpha) + 3b_{3}n^{2}sin^{2}\alpha]sin2\alpha}{2c_{1}\sqrt{(1 - n^{2}sin^{2}\alpha)^{5}}}\delta_{0}\alpha \right) \Delta t.$$
(14)

Аналогично найдем полное аналитическое выражение для концентрационной погрешности, продифференцировав уравнение (11) по *q*:

$$\delta\varphi_{q} = \omega \cdot \left(\frac{2a_{2}D(1 - 2n^{2}sin^{2}\alpha)sin\alpha}{c_{1}c_{2}\sqrt{(1 - n^{2}sin^{2}\alpha)^{3}}}v + \frac{a_{2}D(1 + 2n^{2}sin^{2}\alpha)sin2\alpha}{2c_{1}\sqrt{(1 - n^{2}sin^{2}\alpha)^{5}}}\delta_{0}\alpha\right)\Delta q.$$
 (15)

Первые члены выражений (14) и (15) определяют соответственно чистотемпературные и чистоконцентрационные погрешности, которые сложным образом зависят от параметров преобразователя и объекта измерения. При определенных условиях эти выражения обращаются в нуль, что означает автоматическую акустическую компенсацию данных видов погрешностей. Данные условия мы рассмотрим в главе три.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 28 Вторые члены выражений (14) и (15) – дополнительные, обусловленные скомпенсированной асимметрией параметров преобразователя.

Аналитические выражения для погрешностей, обусловленных нескомпенсированными вариациями параметров преобразователя и измеряемой среды, аналогичны соответствующим членам уравнения (11):

$$\delta\varphi_{c_2} = \frac{D}{c_2^2\sqrt{1 - n^2 sin^2\alpha}}\delta c_2; \tag{16}$$

$$\delta\varphi_{c_1} = \frac{l}{c_1^2}\delta c_1 \,. \tag{17}$$

Погрешности, определяемые выражениями (16) и (17), носят характер случайных, так как вариации параметров неизвестны. Такой же характер носят погрешности $\delta \varphi_{\text{рев}}, \delta \varphi_{\text{гидр}}$ и $\delta \varphi_{3,\pi}$, которые к тому же не поддаются точному аналитическому расчету.

Дополнительные температурные и концентрационные погрешности также носят характер случайных погрешностей, так как величины асимметрии обычно неизвестны. Если величины неизвестны, то чистотемпературные и чистоконцентрационные погрешности также следует считать случайными.

С помощью выражений (14) – (17), задавшись величиной максимально допустимой погрешности каждого вида, можно рассчитать требования к точности поддержания параметров объекта измерений и определить величину допусков на изготовление отдельных конструктивных элементов преобразователя, а также допустимую величину вариаций параметров его во время работы прибора. Подробный анализ этих выражений и методика расчета указанных величин представлены в главе три.

Средняя квадратичная абсолютная погрешность измерения разности фаз определяется по следующей формуле:

0	пред	еляется по	следук	ощей	формуле:	
						Лист
14244	Лист	No down	Подпис	Лата	ЮУрГУ — 12.03.01.2020.284 ВКР	29
ИЗМ.	Jlucm	№ докум	Подпись	дата		

$$= \sqrt{(\delta\varphi_t)^2 + (\delta\varphi_q)^2 + (\delta\varphi_{c_2})^2 + (\delta\varphi_{c_1})^2 + (\delta\varphi_{peB})^2 + (\delta\varphi_{rHDP})^2 + (\delta\varphi_{3D})^2}.$$
 (18)

 $\delta \varphi =$

Средняя квадратичная относительная погрешность равна $\frac{\delta \varphi}{\varphi_{\text{макс}}}$, где $\varphi_{\text{макс}}$ – максимальная измеряемая разность фаз, соответствующая максимальным значениям скорости потока $v_{\text{макс}}$ или расхода $Q_{\text{макс}}$.

Для дальнейшего исследования чувствительности и диапазонов измерения достаточно применять упрощенные формулы, которые получаются из полных в предположении, что оба электронно-акустических канала расходомера абсолютно симметричны и никаких погрешностей (акустических, гидродинамических и электронных), за исключением чистотемпературных и чистоконцентрационных, нет.

Ниже представлен вывод упрощенных формул ультразвуковых расходомеров по фазовым схемам с преломлением [6].

$$\Delta \varphi = \frac{2\omega D \sin\alpha}{c_1 c_2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}} v \,. \tag{19}$$

Решим уравнение (19) относительно *v*:

$$v = \frac{c_1 c_2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}}{2\omega D \sin \alpha} \Delta \varphi .$$
⁽²⁰⁾

Считая, что измеренная ультразвуковым расходомером скорость потока v равна средней скорости по сечению трубопровода, заменим в (20) ω через $2\pi f$ и $v\left(\frac{M}{\text{сек}}\right)$ через расход $Q\left(\frac{M^3}{4}\right)$ из соотношения

 $Q = 900\pi D^2 v$

H					
	Дата	Подпись	№ докум	Лист	Изм.

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 30 и получим

$$Q = \frac{225c_1c_2D\sqrt{1 - n^2\sin^2\alpha}}{f\sin\alpha}\Delta\varphi.$$
⁽²¹⁾

Выводы по разделу два: на основе принципиальной и функциональной схем преобразователя расхода выведена математическая модель преобразователя расхода, а также уравнения измерений расхода газа. Приведена и проанализирована модель погрешностей измерений преобразователя расхода, на основе которой в разделе три проведены соответствующие расчеты.

					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		51

3 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА

3.1 Акустическая камера: основные положения

Для эффективного решения поставленной задачи будем использовать камеры, называемые наклонными. Они вводят ультразвук в измеряемую среду под наклоном, используя для измерений продольные ультразвуковые волны. В измеряемой среде в зависимости от угла падения могут возбуждаться и продольные, и поперечные волны. Поэтому, чтобы устранить мешающее влияние сдвиговых волн, угол падения должен быть установлен, меньшим по величине, чем первый критический угол, превышение которого ведет к невозможности попадания продольных волн в измеряемую среду.

Конструкция акустической камеры предусматривает наличие нескольких элементов: пьезоэлемента, призмы, демпфера, протектора и корпуса. Соответственно, необходимо каждый элемент рассмотреть в отдельности.

Выбор материала для пьезоэлемента зависит от решаемых задач, так как на требованием коэффициента ряду С К максимальности квадрата электромеханической связи здесь необходимо учесть следующее. Амплитуда полезного сигнала пропорциональна площади пьезоэлемента, но ее увеличение ограничивается нагрузочной характеристикой электрического генератора. Следовательно, предпочтение следует пьезоматериалам малой отдать c электрической проницаемостью.

Таким образом, в качестве материала для пьезоэлемента можно использовать пьезокерамику цирконат-титанат свинца (ЦТС) предпочтительно в форме круглой пластины. Как правило, поперечные размеры таких пластин значительно превышают толщину, поэтому их взаимное влияние на частоты колебаний практически отсутствует. Кроме того, наличие акустических линий задержки (призм) делает несущественным влияние колебаний в поперечных направлениях на работу акустической камеры.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Чрезвычайно большую роль в эксплуатационных характеристиках камеры играет призма, во многом определяющая его функциональную пригодность, так как она оказывает существенное влияние на формирование полезного сигнала и на уровень шумов.

Призма обеспечивает ввод упругих колебаний в измеряемую среду под необходимым углом и их прием. В то же время многократные отражения ультразвуковых волн внутри призмы являются источником реверберационных помех. Поэтому при выборе и изготовлении призмы следует воспользоваться приведенными ниже методами.

Для начала рассмотрим требования к призмам, направленные на подавление в определенной мере акустических шумов. Ультразвуковые волны, выступающие в роли акустических шумов, возникают на границе раздела призма – измеряемая среда за счет различия импедансов обеих сред. Чем ближе эти импедансы, тем меньше исходная амплитуда акустических шумов.

Возникшие на границе раздела сигналы, распространяясь в призме, попадают на пьезоэлемент и вызывают мешающие электрические сигналы. Для уменьшения этих сигналов необходимо добиться их значительного уменьшения в процессе распространения в призме. Уменьшение амплитуды ультразвуковых волн за счет затухания определяется коэффициентом затухания в материале призмы и путем, проходимым по призме ультразвуком. Увеличение коэффициента затухания в материале призмы одновременно уменьшает амплитуду полезного сигнала. Поэтому необходимо стремиться использовать такую конфигурацию призмы, чтобы сигналы, возникшие на границе раздела, не могли непосредственно попасть на пьезоэлемент.

Характеристический импеданс материала призмы одновременно ответственен за акустическое согласование с пьезоэлементом, характеристический импеданс которого высок, и с измеряемой средой, характеристический импеданс которого мал. Акустический контакт между пьезоэлементом и призмой создается средой с малым импедансом (слой масла, клей), но толщина этой среды очень мала, так как

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Лата

склеиваемые поверхности специально обрабатываются, и, следовательно, характеристический импеданс пьезоэлемента со стороны призмы выше. В этих условиях предпочтение отдают малым характеристическим импедансам материала призм, так как толщина контактного слоя между преобразователем и измеряемой средой в процессе контроля изменяется и при акустическом рассогласовании значительно влияет на амплитуду полезного сигнала.

Улучшение соотношения полезный сигнал/шум в акустической камере может быть достигнуто не только соответствующим подбором коэффициента затухания звука, но и уменьшением коэффициента отражения сигналов, создающих шум. Из числа используемых для этой цели приемов для поставленной задачи более эффективным будет нанесение на поверхности нерабочих граней специального слоя из материала, сильно поглощающего звук и хорошо акустически согласующегося с материалом призмы, а также нанесение на отражающие поверхности различного рода неровностей, хорошо рассеивающих звук.

К важным неакустическим требованиям к материалу призм относятся хорошая смачиваемость их поверхности контактной жидкостью, износостойкость и температуростойкость. Первое из требований обеспечивает более высокую стабильность акустического контакта между преобразователем и измеряемой средой при их относительном движении.

Чрезвычайно большое влияние на качество работы акустической камеры оказывает наличие несплошностей в материале призмы или клеевом соединении. С этой точки зрения преимущество следует отдавать материалам, оптическим прозрачным в видимом диапазоне спектра.

Также следует сказать, что для неразъемного соединения пьезоэлемента с призмой наибольшее распространение получило жесткое клеевое соединение.

Учитывая вышеуказанные требования к материалу призмы, следует в качестве него выбрать органическое стекло, обладающее хорошими акустическими свойствами, хорошей смачиваемостью маслами и водой. Органическое стекло весьма доступно и легко поддается механической обработке. Также следует

Изм	Лист	Νο συκλω	Подпись	Лата

отметить, что органическое стекло оптически прозрачно. Однако адгезия к нему эпоксидных клеев невысока и еще более ухудшается при воздействии перепадов температур. Для заданного диапазона рабочих температур следует приклеивать пьезопластину к призме из органического стекла и призму к протектору, о котором будет сказано ниже, клеем БФ-4, а прижатие пьезоэлемента к призме осуществлять либо с помощью заливки компаундом К-153 или компаундом полиуретановым АДВ-13-2 по ТУ 2226-046-227369360-99 [8], либо при помощи прижимной пружины.

Высокие результаты достигаются при принятии мер для предотвращения истирания всей находящейся в контакте с измеряемой средой поверхности призмы. Для этого на поверхность наносится специальный протектор. Протектор может быть сменным, например, полиуретановая пленка, либо постоянным в виде приклеенной пластинки из износостойкого материала. Важным требованием к протектору, наряду с высокой износостойкостью, является хорошее акустическое согласование с материалом призмы и малая (по сравнению с длиной волны) толщина. Кроме полиуретана в качестве протектора используют ситалл и древесностружечные материалы.

Выбранный тип акустических камер обычно не имеет демпфера. Однако часто для герметизации пьезопластину заливают сверху той же клеевой композицией, которой осуществляют приклейку пластины к призме. В этом случае возникает опасность отрыва пластины от призмы в результате усадки герметизирующей массы, плотно склеивающейся с пластиной. Для предотвращения этого на неизлучающую часть пластины предварительно накладывают непроводящий ультразвук эластичный материал (пробку, пенопласт), на который ложится герметизирующая масса [9].

На основе выбранных материалов и форм элементов конструкции камеры построим его 3D-модель с помощью программного пакета SolidWorks. Данную модель представим на рисунке 8.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР



Рисунок 8 – 3D-модель акустической камеры:

1 – стержень камеры; 2 – пьезоэлемент; 3 – компенсатор; 4 – изолирующая втулка; 5 – заглушка; 6 – кабельный разъем

В программном пакете Ansys с помощью блока «Static Structural» для стержня камеры проведем статические исследования, направленные на изучение деформаций конструкции под воздействием заданных давлений и температур измеряемой среды [10].

Проверим влияние статического давления среды, равного 16 атм (1621 кПа), на стержень при нижнем и верхнем значениях температур, равных –25 °C (Рисунок 9) и +85 °C (Рисунок 10) соответственно.

По рисунку 9 видно, что при воздействии давления в 16 атм (1621 кПа) на контактирующую со средой поверхность стержня, охлажденного до -25 °C, последний деформируется с амплитудой 0,14 мм, что является недопустимым при высокоточных измерениях среды. При увеличении температуры до +85 °C (Рисунок 10) мы имеем увеличение амплитуды деформаций до 0,17 мм, что также необходимо учесть при дальнейшем проектировании конструкции.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Лата	

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 36



Рисунок 9 – Результаты статического исследования влияния факторов измеряемой среды на стержень камеры: давление 16 атм (1621 кПа) и температура –25 °С

Таким образом, после проведения исследований по влиянию факторов измеряемой среды на конструкцию камеры можно сделать вывод, что непосредственный контакт стержня с измеряемой средой недопустим и необходимо вместо схемы с одной преломляющей поверхностью применить схему измерительного преобразователя с двумя преломляющими поверхностями. Данные схемы в двухканальном исполнении представим на рисунке 11, при этом нужно не забывать о том, что при проектировании мы используем одноканальную схему, которая обеспечивает более точные показания, чем двухканальная.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

В этом случае преломляющими являются внутренняя и наружная поверхности трубопровода, а направление распространения волн в измеряемой среде не зависит от изменений скорости ультразвука в стенке трубопровода.



Рисунок 10 – Результаты статического исследования влияния факторов измеряемой среды на стержень камеры: давление 16 атм (1621 кПа) и температура +85 °C

После выбора схемы с двумя преломляющими поверхностями встает задача выбора иного материала для звукопровода, свойства которого позволят выполнить условие автоматической компенсации чистоконцентрационных погрешностей. Для его выполнения необходимо, чтобы скорость ультразвука в звукопроводе была близка по значению к скорости ультразвука в измеряемой

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

среде. Выполнение данного условия возможно только при применении жидкостного звукопровода. Скорость ультразвука в жидкостях близка по значению к скорости ультразвука в газах.





Рисунок 11 – Схемы двухканальных бесконтактных акустических измерительных преобразователей.

Число преломляющих поверхностей:

а) – одна; *б)* – две; И₁, И₂ – излучающие пьезоэлементы; П₁, П₂ – приемные пьезоэлементы; *H*₀ – кратчайшее расстояние от центра пьезоэлемента до оси трубопровода преобразователя; *R*, *R*₁ – радиусы преломляющих поверхностей

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		39

Для того, чтобы выбрать материал для жидкостного звукопровода, проведем расчет средней скорости ультразвука в измеряемой среде по следующей формуле [11]:

$$c_2 = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P_2}{\rho_2}},$$

где c_2 – скорость ультразвука в измеряемой среде, $\frac{M}{c}$;

γ – адиабатический модуль объемной упругости газа;

P₂ – давление измеряемой среды, Па;

 ρ_2 – плотность измеряемой среды, $\frac{\kappa \Gamma}{M^3}$.

$$c_2 = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 1,6 \cdot 10^6}{1,15161}} = 1291,2 \frac{M}{c}.$$

В качестве материала для жидкостного звукопровода выберем компрессорное масло, так как зависимость скорости ультразвука от температуры среды у него меньше, чем, например, у воды [12]. Компрессорное масло выберем без присадок марки К-19, плотность которого составляет 900 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а скорость звука в нем равна $c_1 = 1415 \frac{\text{м}}{c}$ [11].

3.2 Оценка чувствительности и диапазона измерения

С точки зрения метрологии и потребностей потребителя чувствительность и диапазоны измерений будем рассматривать относительно скорости потока и относительно расхода соответственно.

Чувствительность расходомера определяется как приращение непосредственно измеряемой величины (в нашем случае, разности фаз колебаний) при изменении

					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		40
скорости потока или расхода на единицу измерений. В качестве единицы скорости потока примем 1 м/сек, в качестве единицы расхода – 1 м³/с.

Также будем считать, что изменение расхода начинается от нуля, и не будем рассматривать диапазоны измерений с утопленным нулем. Следовательно, величина и верхняя граница диапазона измерений будут количественно совпадать между собой. Тогда диапазоном измерений будут считаться оба этих понятия.

Диапазон измерений ограничен сверху, если рассматриваемая характеристика определяет максимальное значение этой величины. Например, в фазовых схемах диапазон измерения разности фаз не должен превышать π или 2π , это зависит от схемы фазометра.

Чувствительность и диапазоны измерений зависят от совокупности многих факторов, важнейшие из которых связаны с условиями измерения и наличием погрешностей различного происхождения. Поэтому наиболее значимые погрешности будем оценивать как качественно, так и количественно.

Для количественных расчетов примем такие же требования по точности, как для большинства расходомеров общепромышленного назначения – суммарная основная погрешность измерений не должна превышать (1,5-2,5) %. В соответствии с этим целесообразно ограничить погрешность каждого вида величиной ± 1 %.

Для расчета чувствительности и диапазонов измерений преобразователей с одной преломляющей поверхностью используем формулы (20) – по скорости потока и (21) – по расходу. Оценим возможные значения величин, входящих в эти формулы.

Диапазон измерения разности фаз в линейной области не превышает $\Delta \varphi = 2$ рад, а максимальная погрешность измерения разности фаз не должна превышать 0,02 рад.

В качестве материала для жидкостного звукопровода было выбрано компрессорное масло К-19. Скорость ультразвука в нем при нормальных условиях достигает $c_1 = 1503 \frac{M}{c}$ [13]. Также в пункте 3.1 была вычислена средняя

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист 41 скорость ультразвука в измеряемой среде, равная $c_2 = 1291 \frac{M}{c}$, следовательно, коэффициент преломления измеряемой среды относительно внешнего звукопровода будет равен $n = \frac{c_2}{c_1} = 0,86$. Диаметр трубы равен $D = 50 \cdot 10^{-3}$ м.

Величина угла α также должна быть выбрана максимальной для обеспечения высокой чувствительности. Однако, по конструктивным соображениям, не следует осуществлять угол α , превышающий $\frac{\pi}{3}$. В пункте 3.3 по формуле (25) проведен расчет оптимального угла излучения, значение которого равно 55°.

Для увеличения чувствительности расходомера рабочая частота должна быть выбрана максимальной. Однако повышение частоты ограничивается ростом затухания ультразвука в измеряемой жидкости и звукопроводах. Поэтому при измерении расхода газовых сред следует выбирать частоту, не превышающую десятки или сотни кГц. Определим максимально допустимую рабочую частоту по формуле (20), основываясь на данных о максимальной скорости потока среды:

$$\frac{2 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot \sqrt{1 - 0.86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(55^\circ)} = 30 \frac{M}{c}.$$

Исходя из вычислений, рабочая частота f не должна превышать 176900 Гц.

Учитывая вышеприведенные данные, проведем анализ чувствительности скорости потока и расхода среды, а также рассчитаем возможные диапазоны измерений для тех же показателей.

Чувствительность скорости потока:

$$\frac{\Delta\varphi}{v} = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot 176,9 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(55^\circ)}{1503 \cdot 1291 \cdot \sqrt{1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}} = 0,067 \ \frac{\text{pag} \cdot \text{c}}{\text{M}}.$$

Чувствительность расхода среды:

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 42

$$\frac{\Delta\varphi}{Q} = \frac{176,9 \cdot 10^3 \cdot \sin(55^\circ)}{225 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}} = 0,00943 \frac{\text{pag} \cdot \text{c}}{\text{M}^3}.$$

Диапазон измерений для скорости потока:

$$v = \frac{2 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot \sqrt{1 - 0.86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2 \cdot 2\pi \cdot 176.9 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(55^\circ)} = 30 \frac{M}{c}.$$

Диапазон измерений для расхода среды:

$$Q = \frac{2 \cdot 225 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1 - 0.86^2 \cdot sin^2(55^\circ)}}{2\pi \cdot 176.9 \cdot 10^3 \cdot sin(55^\circ)} = 33.75 \frac{\text{M}^3}{\text{c}}.$$

Следует отметить, что ограничение для диапазона измерения для скорости потока не является критическим, так как он может быть увеличен до любого требуемого значения уменьшением угла α . Аналогично и чувствительность может быть увеличена при помощи повышения рабочей частоты, если это допускают свойства измеряемой среды.

Анализ зависимости чувствительности преобразователя от скорости ультразвука в измеряемой среде и угла центрального луча в ней удобнее производить при помощи обобщенной упрощенной формулы:

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Лист 43

$$\Delta \varphi = \frac{8\pi f R}{c_2^2} \cdot v \cdot t g \beta_n, \qquad (22)$$

где *R* – радиус трубы, в которой протекает измеряемая среда, м;

 c_2 – скорость ультразвука в измеряемой среде, м/с;

v – скорость потока измеряемой среды, м/с;

β_n – угол между нормалью к оси трубопровода и направлением распространения ультразвуковой волны в измеряемой жидкости, рад.

Введя понятие приведенной чувствительности $\frac{\Delta \varphi}{D \cdot f \cdot v}$ можно привести формулу (22) к следующему виду:

$$\frac{\Delta\varphi}{Dfv} = \frac{4\pi}{c_2^2} \cdot tg\beta_n. \tag{23}$$

Как следует из формулы (23), чувствительность не зависит от времени распространения волны в стенках трубопровода и внешних звукопроводах и определяется скоростью c_2 и углом β_n .

Угол излучения α , каждый из промежуточных углов и угол в измеряемой жидкости β_n должны быть ограничены величиной $\frac{\pi}{3}$, так как при большей величине угла наблюдается резкое падение коэффициента пропускания ультразвуковой волны через стенку трубопровода в измеряемый поток жидкости. При этом условии максимальная приведенная чувствительность определяется выражением:

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

Лист 44

$$\frac{\Delta \varphi_m}{Dfv} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{c_2 \cdot c_m \cdot \sqrt{1 - 0.75 \cdot \frac{c_2^2}{c_m^2}}},$$
(24)

где c_m – скорость распространения ультразвука в той среде преобразователя, где она имеет наибольшее значение, $\frac{M}{c}$.

Вычислим максимальную приведенную чувствительность по формуле (24):

$$\frac{\Delta\varphi_m}{Dfv} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{1291\cdot 1690\cdot\sqrt{1-0.75\cdot\frac{1291^2}{1690^2}}} = 6.65\cdot 10^{-6} \frac{\text{pag} \ast \text{c}}{\Gamma_{\text{II}} \ast \text{m}^2}$$

Максимальная приведенная чувствительность для каждого звукопровода с относительно небольшой скоростью ультразвука имеет вполне определенный минимум, при котором обеспечивается автоматическая акустическая компенсация температурных погрешностей измерения расхода фазовым методом при угле излучения, близком по значению к $\frac{\pi}{3}$ [6].

3.3 Расчет конструкции проточной части преобразователя

Для решения поставленной задачи измерения расхода в промышленных фазовый преобразователь достаточно использовать c двумя условиях преломляющими поверхностями, который имеет возможность устранения реверберационных погрешностей и обеспечения автоматической компенсации чистотемпературных и чистоконцентрационных погрешностей. Физическая сущность автоматической акустической компенсации чистотемпературных и чистоконцентрационных погрешностей заключается в том, что при определенных соотношениях между параметрами преобразователя и объекта измерения изменение температуры измеряемой среды и звукопроводов или концентрации вызывает изменения разности среды не волновых длин между двумя

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Лата

последовательными тактами коммутации. Такой эффект достигается в результате того, что при температурных и концентрационных изменениях скорости ультразвука показатель преломления меняется. При этом воздействие изменения показателя преломления на разность волновых длин противонаправлено непосредственному воздействию изменения скорости ультразвука, и они компенсируют друг друга. Также в данном типе схем исключено влияние изменений затухания ультразвука.

Для обеспечения достаточной точности измерения расхода при резких колебаниях температуры измеряемой среды необходимо использовать одноканальную измерительную схему.

Этапы расчета преобразователя:

1. Проведем расчет угла α , учитывая условие автоматической компенсации чистоконцентрационных погрешностей. При этом угол α и любой из углов в промежуточных средах не должны значительно превышать величины $\frac{\pi}{2}$.

Условие автоматической компенсации чистоконцентрационных погрешностей:

$$\sin\alpha = \frac{1}{n \cdot \sqrt{2}}.$$
(25)

По формуле (25) вычислим оптимальное значение угла α :

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{0,86 \cdot \sqrt{2}} = 55,395 \approx 55^{\circ}.$$

2. Определим по условию автоматической компенсации чистотемпературных погрешностей возможные значения акустических характеристик материала внешних звукопроводов.

Условие автоматической компенсации чистотемпературных погрешностей:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	16
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	40

$$\sin\alpha = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{b_1 + b_2}{2b_2}},\tag{26}$$

где b_1 – температурный коэффициент для материала звукопровода, $\frac{1}{2}$;

 b_2 – температурный коэффициент для измеряемой среды, $\frac{1}{2}$.

Компенсация осуществляется при определенных значениях n и любых значениях угла α в диапазоне 50 – 70°. Верхний предел этого диапазона ограничен конструктивными соображениями, а нижний – нежелательностью уменьшения чувствительности. Температурный коэффициент скорости ультразвука в измеряемой среде может иметь любой знак, как в жидкостных звукопроводах. Но при этом при значениях n > 0,8 и в диапазоне углов $\alpha = 0,87 - 1,22$ рад компенсация обеспечивается только при одинаковых знаках величин b_1 и b_2 .

B ЭТОМ случае можно сказать. что автоматическая компенсация чистотемпературных погрешностей может быть осуществлена с помощью преобразователей с жидкостными внешними звукопроводами. Для этой цели выбранное К-19. подойдет 3.2 компрессорное масло марки В пункте температурный коэффициент которого составляет $b_1 = 0,0023 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\circ c}$. Для измеряемой среды этот же коэффициент равен $b_2 = 0,14 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\circ c} [13].$

Проверим выполнение условия автоматической компенсации температурных погрешностей по формуле (26), вычислив значения правой и левой частей данного выражения.

$$sin(55^{\circ}) = 0,823.$$

$$\frac{1}{0,86} \cdot \sqrt{\frac{0,0023 \cdot 10^{-3} + 0,14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,14 \cdot 10^{-3}}} = 0,824.$$

					ЮУрГУ—
и.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	2

ОУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 47 Как видно по данным вычислениям, выражения в правой и левой частях выражения (26) примерно равны, что доказывает выполнение условия автоматической компенсации температурных погрешностей.

3. Проведем расчет величины максимально допустимых колебаний температуры Δt_{max} и соответствующей им величины чистотемпературных погрешностей $\delta \varphi_{t_0}$ по формулам (27) и (28) соответственно с учетом того, что относительная чистотемпературная погрешность не должна превышать 0,06 % на заданном диапазоне изменения температуры измеряемой среды.

$$\Delta t_{max} = \frac{0.01 \cdot (1 - n^2 \sin^2 \alpha)}{b_1 + b_2 \cdot (1 - 2 \cdot n^2 \sin^2 \alpha)} ; \qquad (27)$$

$$\left|\delta\varphi_{t_0}\right| = \frac{b_1 + b_2 \cdot (1 - 2 \cdot n^2 \sin^2 \alpha)}{1 - n^2 \sin^2 \alpha} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta t_{max}.$$
⁽²⁸⁾

$$\Delta t_{max} = \frac{0,0006 \cdot (1 - 0,86^2 sin^2(55^\circ))}{0,0023 \cdot 10^{-3} + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 2 \cdot 0,86^2 sin^2(55^\circ))} = 127,97 \text{ °C};$$

$$\begin{split} \left| \delta \varphi_{t_0} \right| &= \frac{0,0023 \cdot 10^{-3} + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - 2 \cdot 0,86^2 sin^2(55^\circ) \right)}{1 - 0,86^2 sin^2(55^\circ)} \cdot 2 \cdot 127,97 = \\ &= 0,0012 \text{ рад.} \end{split}$$

4. Проведем расчет величины максимально допустимых колебаний концентрации Δq_{max} и соответствующей им величины чистоконцентрационных погрешностей $\delta \varphi_{q_0}$ по формулам (29) и (30) соответственно с учетом того, что относительная чистоконцентрационная погрешность практически равна нулю на заданном диапазоне изменения концентрации измеряемой среды.

$$\Delta q_{max} = \frac{10^{-18} \cdot (1 - n^2 \sin^2 \alpha)}{a_2 \cdot (1 - 2 \cdot n^2 \sin^2 \alpha)} ;$$
⁽²⁹⁾

						Лисп
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	10
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		40

$$\left|\delta\varphi_{q_0}\right| = \frac{a_2 \cdot (1 - 2 \cdot n^2 \sin^2 \alpha)}{1 - n^2 \sin^2 \alpha} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta q_{max}.$$
(30)

$$\Delta q_{max} = \frac{10^{-18} \cdot \left(1 - 0.86^2 \sin^2(55^\circ)\right)}{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - 2 \cdot 0.86^2 \sin^2(55^\circ)\right)} = -1.501 \frac{\mathrm{Kr}}{\mathrm{M}^3};$$

$$\left|\delta\varphi_{q_0}\right| = \frac{1.5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - 2 \cdot 0.86^2 sin^2(55^\circ)\right)}{1 - 0.86^2 sin^2(55^\circ)} \cdot 2 \cdot (-1.501) = 0 \text{ рад}$$

Получив в результате отрицательное значение диапазона нужно иметь в виду, что знак диапазона значения не имеет, и диапазон необходимо рассматривать с точки зрения абсолютной величины. Это правило распространяется и на значения погрешностей.

Таким образом, акустические характеристики выбранного для звукопровода материала обеспечивают минимальную величину чистотемпературных погрешностей на заданном диапазоне температур среды.

5. Проведем расчет погрешностей, обусловленных асимметрией скорости звука в измеряемой среде и звукопроводах по формулам (31) и (32) соответственно. При $(\delta \varphi_{c_2})_{\text{макс}} = 0,02$ рад и $(\delta \varphi_{c_1})_{\text{макс}} = 0,02$ рад эти формулы будут иметь вид:

$$\delta c_{2_{max}} = \frac{0.02 \cdot c_2^2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}}{\omega \cdot D}; \qquad (31)$$

$$\delta c_{1_{max}} = \frac{0.02 \cdot c_1^2}{\omega \cdot l}.$$
(32)

$$\delta c_{2_{max}} = \frac{0.02 \cdot 1291^2 \sqrt{1 - 0.86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2 \cdot \pi \cdot 176.9 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 0.424 \frac{M}{c}$$

					ЮУрГУ — 12.03.01.2020.284 ВКР
м.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•

Лист

49

$$\delta c_{1_{max}} = \frac{0,02 \cdot 1503^2}{2 \cdot \pi \cdot 176,9 \cdot 10^3 \cdot 36,24 \cdot 10^{-3}} = 1,115 \ \frac{\text{M}}{\text{c}}.$$

6. Проведем расчет погрешности, обусловленной асимметрией углов *α*, по формуле (33) при учете, что погрешность не должна превышать 0,02 рад.

$$\delta_0 \alpha_{\text{MAKC}} = \frac{0,02 \cdot 0,2 \cdot c_1 \cdot \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^5}}{\omega \cdot D \cdot [(b_3 - b_1)(1 - n^2 \sin^2 \alpha) + 3b_3 n^2 \sin^2 \alpha] \cdot \sin 2\alpha}.$$
 (33)

$$\delta_{0}\alpha_{\text{MAKC}} =$$

$$= \frac{0,02 \cdot 0,2 \cdot 1503 \cdot \sqrt{\left(1 - 0,86^{2} \cdot \sin^{2}(55^{\circ})\right)^{5}}}{2 \cdot \pi \cdot 176,9 \cdot 10^{3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(2 \cdot 55^{\circ})} \times \frac{1}{\left[(0,134 + 0,0023)\left(1 - 0,86^{2} \cdot \sin^{2}(55^{\circ})\right) + 3 \cdot 0,134 \cdot 0,86^{2} \cdot \sin^{2}(55^{\circ})\right] \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 0,077 \text{ рад.}$$

Если переводить радианы в градусы, то 0,077 рад составляет 4,405 градусов. Следовательно, для соблюдения рамок максимально возможных отклонений будет достаточно нормальной точности изготовления, которой соответствуют 10-12 квалитеты. Для угловых размеров десятому квалитету соответствует допуск в 0,0007 рад [14].

7. При работе расходомера между проверками и корректировками нуля могут появляться нескомпенсированные разности вариаций параметров акустических каналов, в частности углов *α*. Причинами таких вариаций могут служить: воздействие измеряемой среды (зарастание или истирание), недостаточная жесткость конструкции преобразователя, температурные деформации и т.д. Наличие нескомпенсированной разности вариаций какого-либо параметра вызывает появление соответствующих погрешностей, величина которых может быть определена при помощи полных формул.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

лист 50 Таким образом, в фазовых схемах с преломлением максимально допустимые вариации углов α в предположении, что абсолютная погрешность не должна превышать 0,02 рад, можно рассчитать по формуле (34).

$$\delta \alpha_{\text{MAKC}} = \frac{0.04 \cdot c_1 \cdot \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^3}}{\omega \cdot n \cdot D \cdot \sin^2 \alpha}.$$
(34)

$$\delta \alpha_{\text{MAKC}} = \frac{0,04 \cdot 1503 \cdot \sqrt{\left(1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)\right)^3}}{2 \cdot \pi \cdot 176,9 \cdot 10^3 \cdot 0,86 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin\left(2 \cdot 55^\circ\right)} = 4,09 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Расчеты показывают, что требования к жесткости и точности изготовления конструкции достаточно высоки и перекос каналов вследствие механической или тепловой деформации не должен превышать нескольких десятитысячных долей радиана. Поэтому следует в качестве материала для труб выбрать нержавеющую сталь, обладающую высокой коррозионно- и термостойкостью. Следует отметить, что максимально допустимые вариации углов обратно пропорциональны диаметру трубопровода.

8. Проведем расчет минимально допустимого радиуса *r* пьезоэлемента по формуле (35), которая обусловлена требованием к обеспечению направленности излучения.

$$r \ge 1 \div 2\frac{c_{\pi}}{f'} \tag{35}$$

где $c_{\rm n}$ – скорость распространения ультразвука в пьезоэлементе, м/с.

Благодаря своим высоким пьезоэлектрическим свойствам цирконат-титанат свинца часто применяется в качестве материала для пьезоэлементов ультразвуковых расходомеров. Скорость ультразвука в нем составляет 2900 м/с.

Тогда минимально допустимый радиус *r* пьезоэлемента:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	51
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•	51

$$r \ge 1 \cdot \frac{2900}{176,9 \cdot 10^3};$$

r ≥ 16,39 мм.

Исходя из вычисленных данных, выберем подходящий по типоразмеру пьезоэлемент с формой диска из каталога компании «Аврора-ЭЛМА». Наиболее подходящий пьезоэлемент изготовлен из материала цирконат-титанат свинца марки ЦТС-19, имеет исполнение 251. Его диаметр составляет 33 мм, а толщина 3 мм [15].

9. Проведем расчет требуемого расстояния H_0 от центра пьезоэлементов до оси преобразователя по формуле (36).

$$\frac{H_0 - R}{r} \ge 2 \cdot A(\alpha_0, \alpha_t) \cdot \cos \alpha_0, \tag{36}$$

где *R* – радиус трубы, м;

 $A(\alpha_0, \alpha_t)$ – величина, значение которой определяется по справочным данным, исходя из того, что коэффициент преломления для компрессорного масла $\alpha_t = 0,2540$ [16], а угол $\alpha_0 = 55^\circ$.

Также можно отметить, что при α_0 , близком к $\frac{\pi}{3}$, и $A(\alpha_0, \alpha_t) = 1,3$ в преобразователе будет иметь место минимум температурных погрешностей, обусловленных технологической асимметрией температур, с одновременным исключением попадания поперечной волны на пьезоэлемент.

Таким образом, требуемое расстояние от центра пьезоэлементов до оси *H*₀ преобразователя:

$$\frac{H_0 - 0.5 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{16.5 \cdot 10^{-3}} \ge 2 \cdot 1.3 \cdot \cos(55^\circ);$$

					ЮУрГУ
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 52 Н₀ ≥ 49,36 мм.

10. Для нашего случая, когда диаметр трубопровода меньше 100 мм, используем чертеж корпуса преобразователя с плоской внешней поверхностью, представленный на рисунке 12.



Рисунок 12 – Схематический чертеж корпуса преобразователя с двумя преломляющими поверхностями с плоской внешней преломляющей поверхностью при диаметрах трубопровода менее 100 мм

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	52
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		23

Прохождение ультразвуковых волн при этом осуществляется через стальную накладку *6*, вваренную в трубопровод *1* и обработанную заподлицо с его внутренней поверхностью. При этом герметизация жидкостного звукопровода обеспечивается с помощью резинового кольца 2 при закреплении камеры болтами, завинчиваемыми в глухие отверстия *3* в стенке трубопровода.

Снижение величины $H_0 - R_1$, где $R_1 = H_1$, целесообразно для уменьшения погрешностей, обусловленных возможной технологической асимметрией каналов по температуре жидкостных звукопроводов.

Величина минимального расстояния $H_{0_{MUH}} - R_1$, то есть расстояние от центра пьезоэлементов до внешней стороны стальной накладки, определяется следующим выражением:

$$H_{0_{\text{MHH}}} - R_1 = (r + b_1 + b_2) \cdot \sin\alpha, \tag{37}$$

где *b*₁ – зазор между поверхностью пьезоэлемента и внутренней поверхностью держателя мембраны, м;

*b*₂ – толщина стенки держателя мембраны, м.

Минимальные величины зазора b_1 и толщины b_2 для пластмассовых мембран составляют $b_1 = 1,2 \div 1,5$ мм; $b_2 = 2,5 \div 3$ мм.

Выбрав минимально допустимыми величины b_1 и b_2 , рассчитаем величину R_1 по формуле (37).

$$R_1 = 49,36 \cdot 10^{-3} - (16,5 + 1,2 + 2,5) \cdot 10^{-3} \cdot sin(55^\circ);$$

$$R_1 = 32,74$$
 мм.

Исходя из найденной величины найдем минимальную толщину стальной накладки по следующей формуле:

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	5 1
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	34

$$b_4 = R_1 - R, \tag{38}$$

где b_4 – минимальная толщина стальной накладки, м.

$$b_4 = (32,74 - 25) \cdot 10^{-3};$$

11. По формулам (39) – (42) проведем расчет осевого расстояния *L* между точками 1 и 4, показанными на рисунке 13.



Рисунок 13 - Схема двухканального бесконтактного акустического измерительного преобразователя.

И₁, И₂ – излучающие пьезоэлементы; П₁, П₂ – приемные пьезоэлементы; H₀ – кратчайшее расстояние от центра пьезоэлемента до оси трубопровода преобразователя; R, R₁ – радиусы преломляющих поверхностей

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	5.5
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		55

$$L = l_{1,2} + l_{2,3} + l_{3,4}; (39)$$

$$l_{1,2} = l_{3,4} = tg(\beta_1) \cdot b_4; \tag{40}$$

$$l_{2,3} = tg(\beta_2) \cdot D. \tag{41}$$

где $l_{1,2}$, $l_{2,3}$ и $l_{3,4}$ – это осевые расстояния между соответствующими индексам точками, показанными на рисунке 15, мм;

β₁ – это угол между нормалью к оси трубопровода и лучом ультразвуковой волны, проходящей через стальную накладку (Рисунок 13), рад;

β₂ – это угол между нормалью к оси трубопровода и лучом ультразвуковой волны, проходящей через измеряемую среду (Рисунок 13), рад.

Значение угла β_1 найдем по формуле:

$$\sin\beta_1 = \frac{c_{1,2}}{c_1} \cdot \sin\alpha,\tag{42}$$

где c_{1,2} – поперечная скорость в материале накладки (Рисунок 13), значение которой равно 1690 $\frac{M}{c}$ [13].

$$\beta_1 = \arcsin\left(\frac{1690}{1503} \cdot \sin(55^\circ)\right);$$

$$\beta_1 = 67,7^{\circ}$$

Значение угла β_2 найдем по формуле [6]:

$$\sin\beta_2 = \frac{c_2}{c_1} \cdot \sin\alpha. \tag{43}$$

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

лист 56

$$\beta_2 = \arcsin\left(\frac{1291}{1503} \cdot \sin(55^\circ)\right);$$

 $\beta_2 = 44,99^{\circ}.$

Тогда:

$$l_{1,2} = l_{3,4} = tg(67,7^\circ) \cdot 7,74 \cdot 10^{-3};$$

 $l_{1,2} = l_{3,4} = 18,89$ мм.
 $l_{2,3} = tg(44,99^\circ) \cdot 50 \cdot 10^{-3};$
 $l_{2,3} = 49,98$ мм.

$$L = (18,89 + 49,98 + 18,89) \cdot 10^{-3};$$

Вычислив величину максимальных флуктуаций параметров конструкции изделия, проведем расчет его суммарной максимальной погрешности по формулам (14) – (18) и представим его в приложении А.

Так как реверберационные, гидродинамические и электрические погрешности имеют случайный характер, дадим им оценку по амплитудам их воздействия на точность измерений прибора. Причем, так как в рамках данной работы была проведена разработка средств, уменьшающих реверберационные и гидродинамические погрешности, то они будут иметь меньший характер влияния по сравнению с электрическими.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Как видно по вычислениям, максимальная относительная погрешность измерений прибора составила 0,211 %, что подтверждает эффективность его работы в сравнении с аналогами.

После вычисления оптимальных параметров для конструкции преобразователя проведем их варьирование в определенных диапазонах и аналитическое исследование при обновленных параметрах.

Проведем варьирование значений угла излучения ультразвука α , оптимум которого был выбран равным 55°. Необходимо отметить, что изменение данного параметра ведет невозможности автоматической К компенсации чистотемпературных и чистоконцентрационных погрешностей, что приводит к увеличению суммарной погрешности измерений. Также следует учесть, что все образом, конструкции взаимосвязаны, параметры таким изменение угла излучения приводит к изменению таких конструктивных параметров, как минимально допустимый радиус пьезоэлементов *r* и минимально допустимое ОТ трубопровода H_0 . расстояние пьезоэлементов до оси Результаты сравнительного анализа при варьировании угла излучения α приведены в таблице 1.

Угол излучения, °	Минимальная рабочая частота, Гц	Чувствительность скорости, рад * с/м	Чувствительность расхода, рад * с/м ³	Диапазон измерений для скорости, м/с	Диапазон измерений для расхода, м ³ /с	Максимально допустимые колебания температуры среды, °	Минимальный радиус пьезоэлемента, мм	Минимальное расстояние от центра пьезоэлемента до оси
30	371900	0,067	0,00943	30	33,75	5,552	7,798	62,152
45	231318	0,067	0,00943	30	33,75	9,974	12,537	55,335
					·			
								Лист
				<u></u> ΩVnΓV.	<i>– 12 0.3 01</i>	2020 28	A RKP	

Подпись

№ докум

Лист

Дата

Таблица 1

⁵⁸

Продолжение таблицы 1

55	176900	0,067	0,00943	30	33,75	127,97	16,39	49,364
60	158874	0,067	0,00943	30	33,75	21,939	18,253	46,45

По результатам, приведенным в таблице 1, можно сказать, что при уменьшении значения угла α увеличивается минимально допустимая рабочая частота излучения, что приводит к значительному увеличению затухания ультразвука в измеряемой среде и звукопроводах, а также увеличиваются габаритные размеры преобразователя. Кроме этого, стоит отметить, что при значении угла α , не равном рассчитанному, не обеспечивается необходимый диапазон изменений температур, заданный по техническому заданию.

Дополнительно проведем сравнительный анализ зависимости погрешности измерений прибора от значения угла *α* с помощью формул (14) – (18). Значение квалитета для изготовления деталей и другие рассчитанные параметры компонентов изделия оставим теми же.

Расчеты по формулам (14) – (18) представим в приложении Б, а результаты расчетов в таблице 2.

Таблица 2

Угол излучения, °	Максимальная относительная погрешность измерений преобразователя, %
30	0,694
45	0,664
55	0,211
60	0,268

Результаты аналитического расчета, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о том, что выбранный для конструкции преобразователя угол излучения является оптимальным в сравнении с другими нормальными углами,

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	·

Лист

так как максимальная относительная погрешность измерений при нем составляет 0,211 %, то есть является минимальной для данной конструкции изделия.

Далее проведем варьирование значений радиуса пьезоэлементов r при учете, что угол излучения $\alpha = 55^{\circ}$. Результаты данного сравнительного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Радиус пьезоэлемента, мм	Минимальное расстояние от центра пьезоэлемента до оси трубы, мм
16,5	49,364
20	54,532
25	61,914
30	69,297

Результаты аналитического расчета, приведенные в таблице 3, показывают, что изменение размеров пьезоэлементов, в основном, влияет лишь на габаритные размеры преобразователя, то есть увеличение радиуса пьезоэлементов ведет к увеличению габаритов всей конструкции преобразователя.

В программном пакете Ansys с помощью блока «Fluid Flow (CFX)» проведем динамические исследования, направленные на сравнение величин перепада скорости в двух типах трубопровода: трубопровода с наличием «карманов» и трубопровода с постоянным профилем, то есть без них. Для наглядности данные исследования проведем при максимальной скорости протекания измеряемой среды и при максимально возможной ее температуре.

На рисунке 14 изображен контур скорости протекания измеряемой среды внутри трубопровода, разрабатываемого в рамках данной работы и не имеющего «карманов». Как видно по изображению, при отсутствии данных «карманов» не происходит изменений профиля скоростей среды и, соответственно, потери напора крайне малы и происходят только на стыках фланцев и стальной трубы, что минимизирует величину гидродинамических погрешностей измерений.

					ЮУрГУ — 12.03.01.2020.284 ВКР
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	·



Рисунок 14 – Результаты исследования на перепад скорости для разрабатываемого трубопровода: контур скоростей при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °С

На рисунке 15 изображена проекция на ось *Y* градиента скорости измеряемой среды для трубопровода, разрабатываемого в рамках данной работы и не имеющего «карманов». Как видно по данным, изображенным на этом рисунке, значительный перепад скоростей происходит только на стыках фланцев и стальной трубы



Рисунок 15 – Результаты исследования на перепад скорости для разрабатываемого трубопровода: проекция градиента скорости на ось *Y* при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °C

						Лист
					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	61
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		01

На рисунке 16 изображен контур скорости протекания измеряемой среды внутри трубопровода с «карманами». Как видно по изображению, из-за наличия данных «карманов» изменяется профиль скоростей среды, а также происходят потеря напора, что приводит к дополнительным погрешностям измерений.



Рисунок 16 – Результаты исследования на перепад скорости для трубопровода с «карманами»: контур скоростей при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °C

На рисунке 17 изображена проекция на ось *Y* градиента скорости измеряемой среды для трубопровода с «карманами». Как видно по данным, изображенным на этом рисунке, в области «карманов» происходит значительный перепад скоростей. Это свидетельствует об активном вихреобразовании, что также приводит к увеличению погрешностей измерений скорости и расхода среды.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР



Рисунок 17 – Результаты исследования на перепад скорости для трубопровода с «карманами»: проекция градиента скорости на ось *У* при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °C

При сравнении максимальных значений, приведенных в легендах двух типов трубопроводов на рисунках 15 и 17, можно заметить, что в варианте без «карманов» величина перепада скоростей меньше примерно в три раза по сравнению с «карманным» вариантом, что также доказывает эффективность разрабатываемой конструкции проточной части.

Выводы по разделу три: изучены основные положения для конструкции акустической камеры ультразвука, построена его 3D-модель и проведены статические исследования по влиянию факторов измеряемой среды на компоненты камеры.

Проведены оценки чувствительности и диапазона измерения преобразователя расхода. Дана оценка погрешности измерений преобразователя расхода, величина которой равна 0,211 %.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Проведен расчет основных элементов конструкции проточной части преобразователя расхода с установлением технических требований на особо ответственные компоненты, в частности акустическую камеру и мерный участок.

Проведены сравнительные аналитические расчеты параметров конструкции проточной части преобразователя с подтверждением оптимальности выбранных элементов. Также проведены сравнительные динамические исследования для течения измеряемой среды в трубопроводе, в результате которых было доказано уменьшение перепада скоростей примерно в три раза при использовании разрабатываемого мерного участка.

						Лисп
					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	61
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•	04

4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА

В предыдущих главах были проведены вычисления конструктивных параметров, необходимых для проектирования преобразователя расхода, а также исследования по их оптимизации. Спроектируем данное изделие в программном пакете SolidWorks и составим для него пакет конструкторской документации.

Проектируемое изделие состоит из трех основных частей:

- акустическая камера;
- мерный участок;
- электронно-измерительный блок.

В рамках данной выпускной квалификационной работы разрабатывается конструкция только акустической камеры и мерного участка, поэтому для полноценности проектируемого изделия используем габаритные размеры электронно-измерительного блока и некоторых других дополнительных частей одного из перечисленных в главе один аналогов - ультразвукового газового расходомера «ЭлМетро-Флоус (ДРУ)» [17].

4.1 Акустическая камера

3D-модель акустической камеры в разрезе представлена на рисунке 18, которая изображена установленной на плоской внешней поверхности мерного участка *1*.

Приклеенный к мембране 6 дисковый пьезоэлемент 7 производства компании «Аврора-ЭЛМА» излучает через нее ультразвуковые колебания в жидкостный звукопровод 4, материалом для которого является компрессорное масло, залитое через отверстие 5 в полость приварной гайки 2, служащей корпусом для акустической камеры [15], [18], [14]. В полости установлена втулка 3, предназначенная для ослабления объемной реверберации жидкостного звукопровода. Для обеспечения герметизации данной полости и, соответственно, резьбового соединения, в отверстие 5 установлен винт М4-6gx11 ГОСТ 1491-80 с

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

уплотнительным кольцом 006-008-14 ГОСТ 9833-87 [19], [20], [21]. Герметизация монтажа мембраны обеспечивается уплотнительным кольцом 045-048-19 ГОСТ 9833-87 13 в цилиндрической выточке корпуса 2 акустической камеры [20]. Электрический нулевой обкладки контакт пластины пьезоэлемента осуществляется с помощью лепестка 9 из латунной фольги, припаянного к латунной контактной втулке 12. Мембрана и эта втулка закреплены в корпусе акустической камеры через компенсатор 14 гайкой М52х1,5 ГОСТ 6393-73 16 [22]. Штифт 1,2х2,5 ГОСТ 3128-70 15 предназначен для исключения проворота мембраны и втулки 12 при сборке акустической камеры [23]. Подвод электрических колебаний от электронно-измерительного блока к потенциальной обкладке пьезоэлемента осуществляется через латунное кольцо демпфера 8, к которому припаян контакт; на рисунке 16 он условно не показан. Пружина 1086-0774 ГОСТ 18793-80 10 предназначена для прижатия дискового пьезоэлемента к мембране [24]. От соприкосновения кольцо демпфера защищено изолирующей втулкой 11. От внешних воздействий и проникновения акустическая камера защищена крышкой 17, имеющей два глухих отверстия «под ключ» [17].



4.2 Мерный участок

Мерный участок изделия состоит из следующих компонентов:

• две трубы с наружным диаметром 62 мм и толщиной стенки 6 мм, изготовленных из материала 12Х18Н10Т в соответствии с ГОСТ 9941-81 [25];

• стальная накладка со сквозным отверстием посередине, диаметр которого равен внутреннему диаметру трубы, приваренная к трубе и обработанная заподлицо с ее внутренней поверхностью [26];

• два приварных фланца 50-16-11-1-F-Ст 25-IV ГОСТ 33259 [27].

На рисунке 19 показана 3D-модель мерного участка.



Рисунок 19 – 3D-модель мерного участка:

I - фланец 50-16-11-1-F-Ст 25-IV ГОСТ 33259; 2 – труба 62х6 – 12Х18Н10Т
 ГОСТ 9941-81; 3 – стальная накладка

4.3 Электронно-измерительный блок

На рисунке 20 в разрезе показана 3D-модель преобразователя расхода. Электронно-измерительный блок состоит из сборочного корпуса 10 из алюминиевого сплава. Изолированные провода 3 через две полые трубки 4 и приподнимающий кронштейн 5 соединяют электронно-измерительный блок 10 с акустической камерой 2, приваренной к стальной накладке мерного участка 1. К

						Лист
					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	67
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•	0/

кронштейну 5 приварен фланец 7, который соединен с ответным фланцем 8 резьбовым соединением, состоящим из четырех винтов M6-6gx10 ГОСТ 11738-84 6 [28]. Электронно-измерительный блок 10 соединен с фланцем 8 с помощью штуцера 9.



Рисунок 20 – 3D-модель преобразователя расхода в разрезе

На рисунке 21 показана 3D-модель электронно-измерительного блока в разрезе; электронное наполнение блока условно не показано. Электронно-измерительный блок состоит из трех основных частей: корпусной детали 2, соединенной со штуцером 3 с помощью резьбового соединения, и двух крышек *1*

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

и 5, соединенных с корпусной деталью 2 с помощью резьбы. Отверстие 4 в корпусной детали 2 закрывается с помощью винтов M20-6gx30 ГОСТ 11738-84 [28]. Крышка 5 имеет сквозное отверстие для контроля измерительных показаний прибора. Защита наполнения электронно-измерительного блока при этом обеспечивается с помощью диска 8 из органического стекла, приклеенного специальным компаундом к корпусу 5 и закрепленного с помощью гайки 6 через прокладку 7.

Все компоненты электронно-измерительного блока, за исключением стандартных, выбраны в качестве готовых изделий и включены в сборку как детали без чертежа [17].



На рисунке 22 показана триметрия 3D-модели преобразователя расхода в сборе.



Рисунок 22 – 3D-модель преобразователя расхода:

1 – мерный участок; 2 – акустическая камера; 3 – электронно-измерительный

блок

В приложениях В и Г для конструкторской документации на изделие представлены: спецификации на преобразователь расхода и акустическую камеру, сборочные чертежи на преобразователь расхода и акустическую камеру, рабочие чертежи разработанных деталей.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Выводы по разделу четыре: была спроектирована конструкция проточной части преобразователя расхода газа. Разработаны и спроектированы такие составляющие ее части, как акустическая камера и мерный участок.

Разработаны 14 чертежей: сборочный чертеж преобразователя расхода, спецификация на него, сборочный чертеж на акустическую камеру, спецификация на нее, рабочие чертежи деталей.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	71
Изм	. Лист	№ докум	Подпись	Дата	,	/1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа технического задания выбрана конструкция проточной части преобразователя для дальнейшего проектирования. В рассмотренных аналогах и патентах выявлены значительные недостатки, решение которых легло в основу дальнейших расчетов и конструирования. Изучен основной принцип действия ультразвуковых преобразователей расхода и их основные элементы.

На основе принципиальной и функциональной схем преобразователя расхода выведена математическая модель преобразователя расхода, а также уравнения измерений расхода газа. Приведена и проанализирована модель погрешностей измерений преобразователя расхода.

Изучены основные положения для конструкции акустической камеры, построена ее 3D-модель и проведены статические исследования по влиянию факторов измеряемой среды на компоненты камеры.

Проведены оценки чувствительности и диапазона измерения преобразователя расхода. Дана оценка погрешности измерений преобразователя расхода, величина которой равна 0,211 %.

Проведен расчет основных элементов конструкции проточной части преобразователя расхода с установлением технических требований на особо ответственные компоненты, в частности акустическую камеру и мерный участок.

Проведены сравнительные аналитические расчеты параметров конструкции проточной части преобразователя с подтверждением оптимальности выбранных элементов. Также проведены сравнительные динамические исследования для течения измеряемой среды в трубопроводе, в результате которых было доказано уменьшение перепада скоростей примерно в три раза при использовании разрабатываемого мерного участка.

Была спроектирована конструкция проточной части преобразователя расхода газа. Разработаны и спроектированы такие составляющие ее части, как акустическая камера и мерный участок.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР	72
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	•	12

Разработаны 14 чертежей: сборочный чертеж преобразователя расхода, спецификация на него, сборочный чертеж на акустическую камеру, спецификация на нее, рабочие чертежи деталей.

						_
						Лист
					ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	72
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		/3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.Расходомерыисчетчики.-https://elmetro.ru/production/flowmeters/elmetro_dru.html.

2. Расходомер попутного нефтяного газа «ВЫМПЕЛ-500». – http://vympel.group/products/flowmeters/vympel-500/.

3. Портативный ультразвуковой расходомер газов «Вымпел-100». – http://vympel.group/products/flowmeters/vympel-100/.

4. Расходомер-счетчик ультразвуковой Prosonic Flow 92F | Endless+Hauser. – https://www.ru.endress.com/ru/Tailor-made-field-instrumentation/Flow-measurement-product-overview/ultrazvukovoj-rasxodomer-Prosonic-Flow-92F.

5. Пат. 2502054 Российская Федерация, МПК G 01 F 1/66. Ультразвуковой расходомер / С.Д. Ледовский. – № 2012115330/28; заявл. 17.04.2012; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. – 9 с.

6. Биргер, Г.И. Ультразвуковые расходомеры / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников – М.: Металлургия, 1964. – 207 с.

7.Коэффициентгидравлическогосопротивления.http://ru.solverbook.com/spravochnik/koefficienty/koefficient-gidravlicheskogo-soprotivleniya/.

8. АДВ-13-2 Компаунд полиуретановый ТУ 2226-046-227369360-99. - https://vitahim-ug.ru/catalog/316-adv-13-2-kompaund-poliuretanovyy-tu-2226-046-227369360-99.html.

9. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / И.Н. Ермолов, М.Б. Гитис и др.; под общ. ред. И.Н. Ермолова. М., Машиностроение, 1986. – 280 с.

10. Шаблий, Л.С. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учебное пособие / Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.

ł	Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.								
						Лист			
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Лата	ЮУрГУ— 12.03.01.2020.284 ВКР	74			

11. Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука: учебное пособие / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленинг. ун-та, 1980. – 280 с.

12. Компрессорное масло для воздушных поршневых и винтовых компрессоров: свойства, выбор, замена, проблемы. – https://oilcool.ru/article/kompressornoe_maslo_kakoe_i_skolko_lit_chem_zamenit_poc hemu_penitsya/.

Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М.
 Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова, – М.:
 Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

14. Справочник контруктора-машиностроителя: в 3 т. / В.И. Анурьев; под ред. И.Н. Жестковой, - 8-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2001. - Т. 1. - 920с.

15. "Аврора-ЭЛМА" - пьезокерамика. – http://avrora-elma.ru.

16. Промышленные масла вокруг нас. 10 незаменимых в производстве. – https://www.atago.net/ru/pdf/parfect_guide/oil-guide-industrial_ru_v01.pdf.

17. Расходомеры-счетчики газа ультразвуковые ЭлМетро-Флоус (ДРУ).Руководствопоэксплуатации.–

https://elmetro.ru/netcat_files/userfiles/DRU/ELMETRO-Flous_DRU_-

_Rukovodstvo_po_expluatatsii_v2.5.pdf.

18. ГОСТ 2590-88. Прокат стальной горячекатаный круглый. Сортамент. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.

19. ГОСТ 1491-80. Винты с цилиндрической головкой классов точности А и В. Конструкция и размеры. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8 с.

20. ГОСТ 9833-87. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Конструкция и размеры. – М.: Издво стандартов, 1998. – 116 с.

21. Орлов, П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие: в
3 кн. / П.И. Орлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. - Кн. 1. – 623 с.

Изм	Лист	No yoraw	Подпись	Лата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

22. ГОСТ 6393-73. Гайки круглые с отверстиями на торце "под ключ" класса точности А. Конструкция и размеры. – М.: Стандартинформ, 2006. – 9 с.

23. ГОСТ 3128-70. Штифты цилиндрические незакаленные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 5 с.

24. ГОСТ 18793-80. Пружины сжатия. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 79 с.

25. ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионно-стойкой стали. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2004.
 – 16 с.

26. ГОСТ 2591-88. Прокат стальной горячекатаный квадратный. Сортамент. – М.: Стандартинформ, 2012. – 15 с.

27. ГОСТ 33259-2015. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление до PN 250. Конструкция, размеры и общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 125 с.

28. ГОСТ 11738-84. Винты с цилиндрической головкой и шестигранным углублением под ключ класса точности А. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 7 с.

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата