

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.

## 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 ультразвукового 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.

					<b>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Личт</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Глухова Ю.В.</i>			<i>Разработка проточной части ультразвукового преобразователя расхода газа</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		<i>Лысова А.А.</i>					6	97
<i>Н.контр.</i>					<i>ЮУрГУ Кафедра ИНИТ</i>			
<i>Утв.</i>		<i>Лапин А.П.</i>						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА .....	9
1.1 Анализ технического задания .....	9
1.2 Обзор аналогов .....	9
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 .....	26
3 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА .....	32
3.1 Акустическая камера: основные положения .....	32
3.2 Оценка чувствительности и диапазона измерения .....	40
3.3 Расчет конструкции проточной части преобразователя .....	45
4 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА .....	65
4.1 Акустическая камера .....	65
4.2 Мерный участок .....	67
4.3 Электронно-измерительный блок .....	67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	72
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	74

### ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчет погрешности измерений преобразователя **Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Расчет погрешности измерений преобразователя в зависимости от угла излучения ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Преобразователь расхода **Ошибка! Закладка не определена.**

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акустическая камера .... **Ошибка! Закладка не определена.**

									Лист
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР				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 случаев ультразвуковой метод измерения расхода является практически единственным 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.



- 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  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- 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

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист

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».

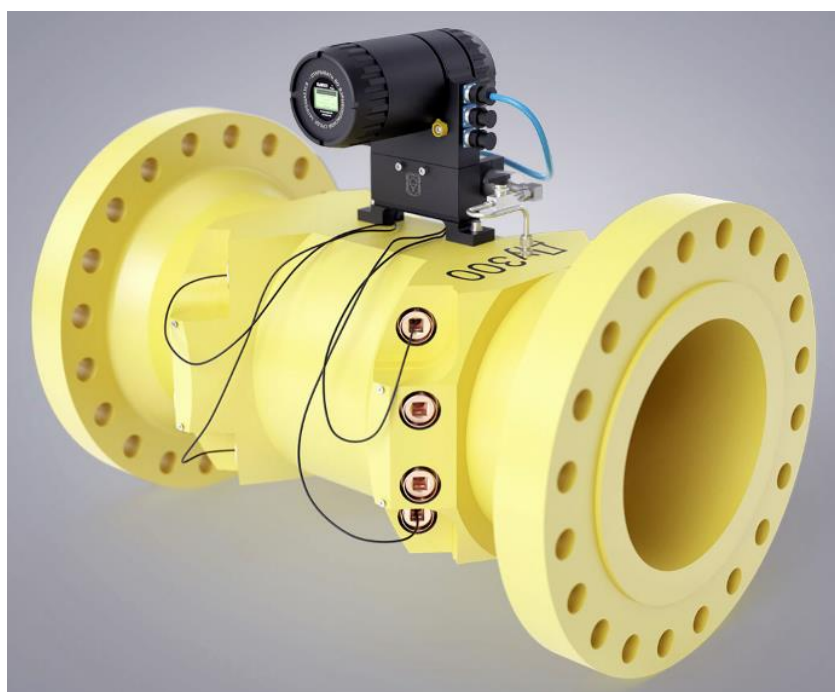


Рисунок 2 – Ультразвуковой расходомер газа «Вымпел-500»

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  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- давление в трубопроводе до 25 МПа [2].

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист

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 каналов. Однако введение более одного измерительного канала вносит дополнительные погрешности, которые также необходимо учитывать при вычислении суммарной погрешности измерений. Также 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
									12
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР				



- предельная погрешность  $\pm 1,0$  %;
- температура окружающей среды от  $-40$  °С до  $+60$  °С;
- 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  $-40$  °С до  $+60$  °С;
- давление в трубопроводе до 25 МПа [4].

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист

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: измерением частоты, фазового сдвига, времени распространения электромагнитных или других волн, например ультразвуковые расходомеры. Автор: Ледовский Сергей Дмитриевич (RU). Номер патента 2502054. Изобретение создано для выравнивания скорости потока, с целью улучшить качество измерения. На участке измерения находится специальный фрагмент с конфузуром на входе и диффузором на выходе [5].

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

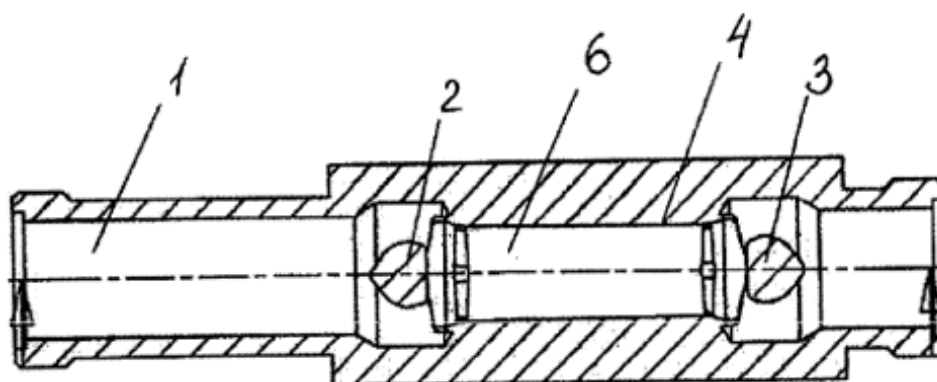


Рисунок 5 – Изображение продольного сечения расходомера из патента РФ №2012115330/28, 17.04.2012

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:



## 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 от соприкосновения с измеряемой средой посредством 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].

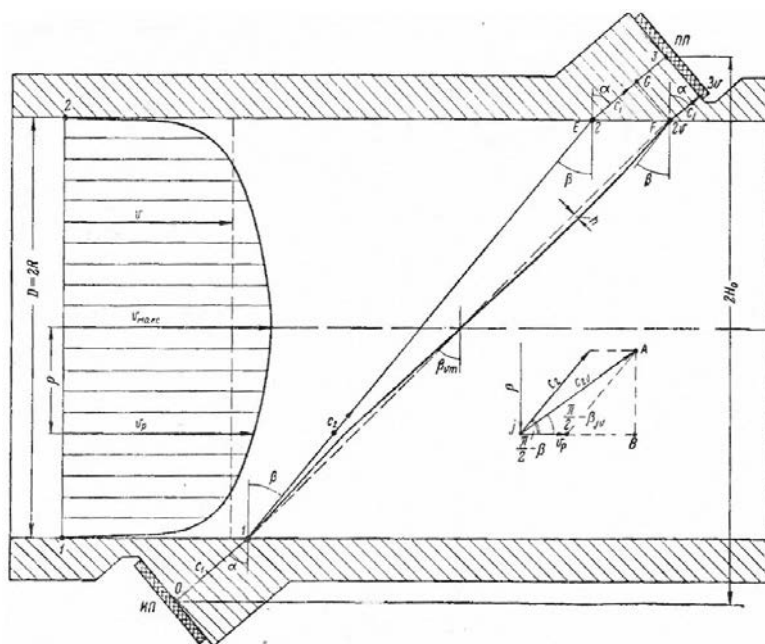


Рисунок 6 – Схема преобразователя с одной преломляющей поверхностью

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

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 скорости потока и асимметрии каналов. Составляющая разности 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.

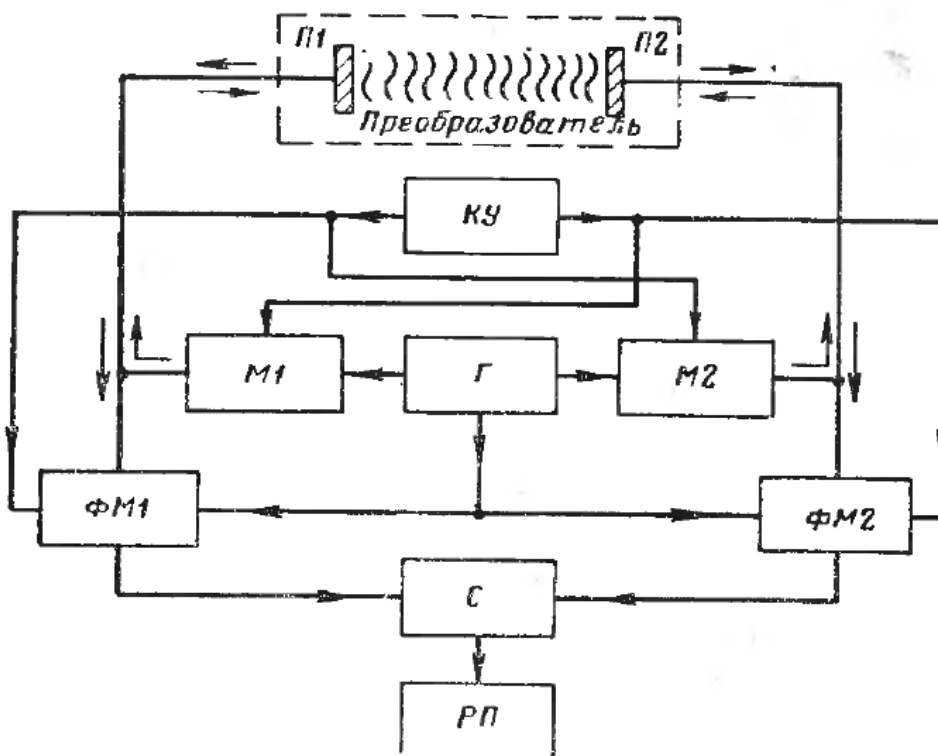


Рисунок 7 – Блок-схема ультразвукового расходомера по одноканальной фазовой схеме с попеременной коммутацией

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 запираии 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.

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  $\rho$  от оси цилиндрического трубопровода радиусом  $R$ , определяется выражением:

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

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

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



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  $\rho$  и шириной  $d\rho$ :

$$v = \int_0^R \left( v_1 + v_2 \cdot \ln \left( 1 - \frac{\rho}{R} \right) \right) \frac{2\pi\rho d\rho}{\pi R^2}. \quad (3)$$

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  $v_\rho$  в любой точке поперечного сечения трубопровода будет определяться выражением:

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

В формуле (4) неизвестным остается коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода  $\lambda$ . 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  $Re < 2300$ :

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

- 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, м<sup>3</sup>/ч;

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

$v$  – скорость потока, м/с;

$A$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

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  $B_{\Gamma}$ :

$$B_r = 1 + 0,625 \sqrt{\frac{\lambda}{2}}.$$

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:

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

- против потока:

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

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

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

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

- по потоку:

$$\tau_{+v} = \frac{2R}{c_2 \cdot \cos\beta} + 2 \frac{H_0 - R}{c_1 \cdot \cos\alpha} - \frac{2R \cdot \operatorname{tg}\beta}{c_2^2} \cdot v \cdot B_r; \quad (8)$$

- против потока:

$$\tau_{-v} = \frac{2R}{c_2 \cdot \cos\beta} + 2 \frac{H_0 - R}{c_1 \cdot \cos\alpha} + \frac{2R \cdot \operatorname{tg}\beta}{c_2^2} \cdot v \cdot B_r. \quad (9)$$

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

$$\Delta\tau = \frac{4R \cdot \operatorname{tg}\beta}{c_2^2} \cdot v \cdot B_r. \quad (10)$$

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

установлены под одинаковым углом  $\alpha$  к оси трубопровода, что вызывает асимметрию углов между каналами.

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

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

где  $\omega$  – частота ультразвуковых колебаний, рад/с;

$D$  – диаметр трубопровода, м;

$n$  – показатель преломления измеряемой среды относительно материала звукопроводов;

$l$  – длина звукопровода, м;

$\delta c_2$  – разность флуктуаций скорости ультразвука в измеряемой среде между каналами преобразователя, м/с;

$\delta c_1$  – разность флуктуаций скорости ультразвука в материале звукопроводов между каналами преобразователя, м/с;

$\delta_0 \alpha$  – асимметрия углов между соответствующими ультразвуковыми лучами и нормальными к оси трубопровода, рад;

$\delta\varphi_{\text{рев}}$  – разность неконтролируемых сдвигов фаз, обусловленных реверберацией ультразвуковых волн, рад;

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

$\delta\varphi_{\text{эл}}$  – 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

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:

$$c_1 = c_{1_0}(1 + b_1 t); c_2 = c_{2_0}(1 + b_2 t + a_2 q). \quad (12)$$

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

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

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  $\Delta t$  или концентрации  $\Delta q$  от номинальных значений



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):

$$\delta\varphi_t = \omega \cdot \left( \frac{2D[b_1 + b_2(1 - 2n^2 \sin^2 \alpha)] \sin \alpha}{c_1 c_2 \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^3}} v + \frac{D[(b_3 - b_1)(1 - n^2 \sin^2 \alpha) + 3b_3 n^2 \sin^2 \alpha] \sin 2\alpha}{2c_1 \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^5}} \delta_0 \alpha \right) \Delta t. \quad (14)$$

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

$$\delta\varphi_q = \omega \cdot \left( \frac{2a_2 D(1 - 2n^2 \sin^2 \alpha) \sin \alpha}{c_1 c_2 \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^3}} v + \frac{a_2 D(1 + 2n^2 \sin^2 \alpha) \sin 2\alpha}{2c_1 \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^5}} \delta_0 \alpha \right) \Delta q. \quad (15)$$

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.



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):

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

$$\delta\varphi_{c_1} = \frac{l}{c_1^2} \delta c_1. \quad (17)$$

Погрешности, определяемые выражениями (16) и (17), носят характер случайных, так как вариации параметров неизвестны. Такой же характер носят погрешности  $\delta\varphi_{рев}$ ,  $\delta\varphi_{гидр}$  и  $\delta\varphi_{эл}$ , 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:

$$\delta\varphi = \sqrt{(\delta\varphi_t)^2 + (\delta\varphi_q)^2 + (\delta\varphi_{c_2})^2 + (\delta\varphi_{c_1})^2 + (\delta\varphi_{рев})^2 + (\delta\varphi_{гидр})^2 + (\delta\varphi_{эл})^2}. \quad (18)$$

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

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].

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

Решим уравнение (19) относительно  $v$ :

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

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

$$Q = 900\pi D^2 v$$

и получим

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

**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.

									Лист
									31
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР</i>				





склеиваемые поверхности специально обрабатываются, и, следовательно, характеристический импеданс пьезоэлемента со стороны призмы выше. В этих условиях предпочтение отдадут 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, оптически 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



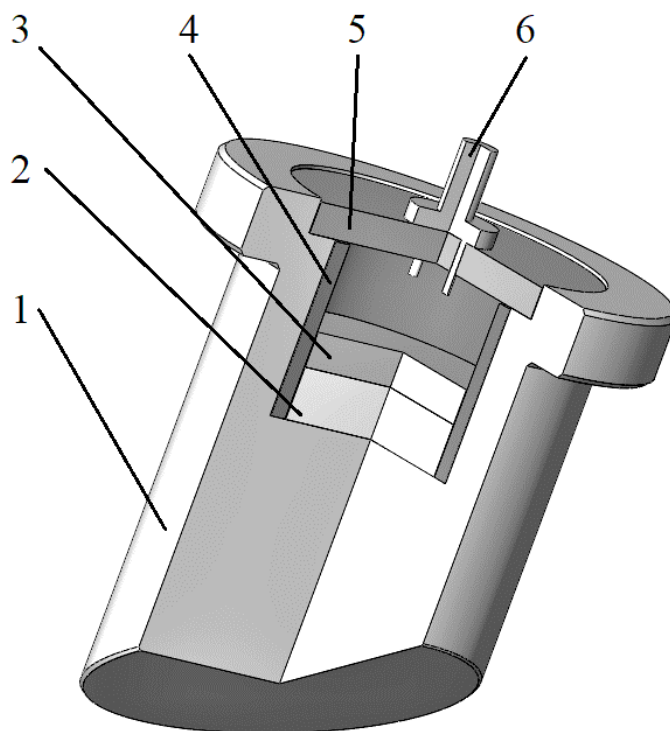


Рисунок 8 –3D-модель акустической камеры:

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  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Рисунок 9) и  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Рисунок 10) соответственно.

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

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата



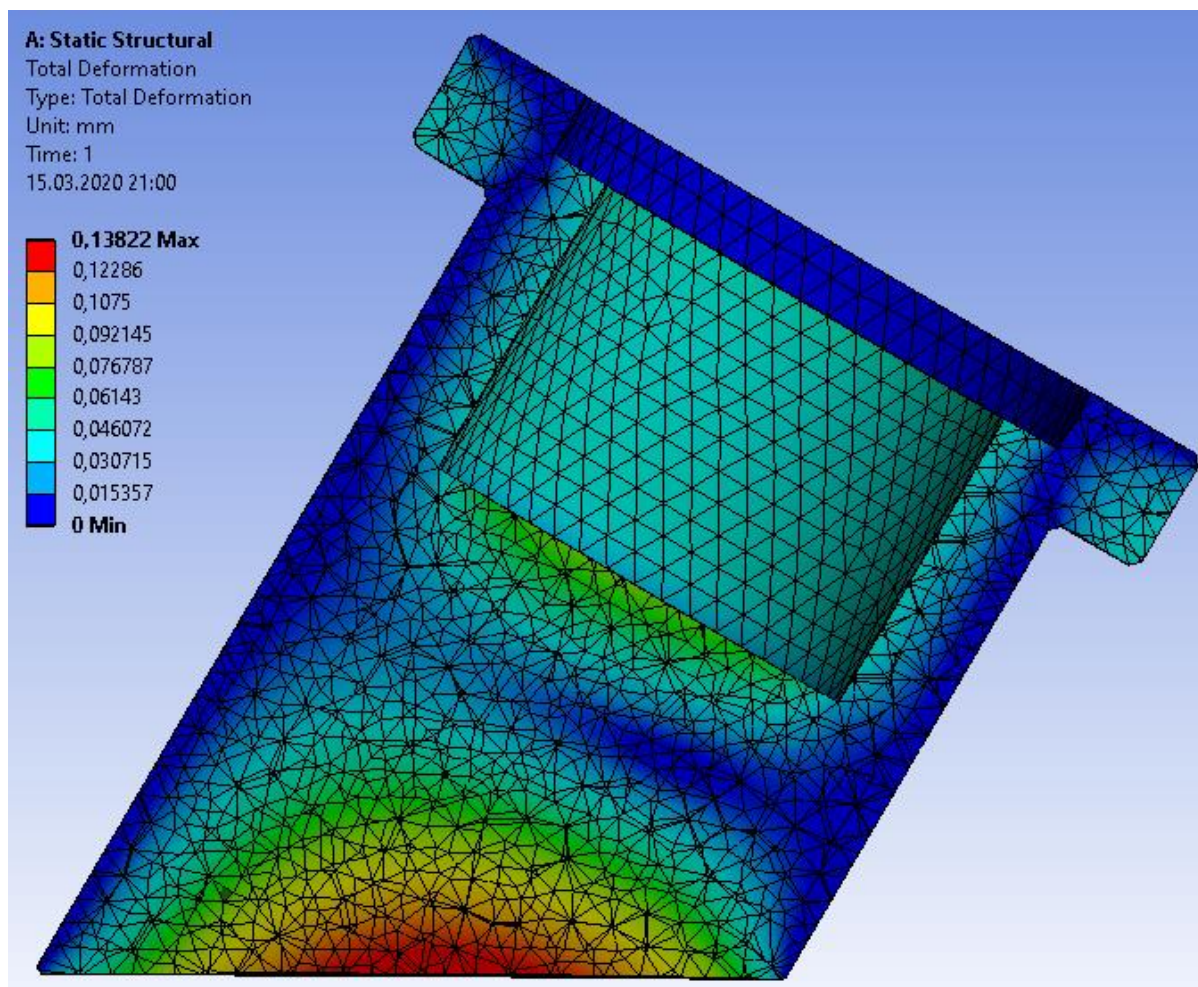


Рисунок 9 – Результаты статического исследования влияния факторов измеряемой среды на стержень камеры: давление 16 атм (1621 кПа) и температура  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$

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

Лист

37

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.

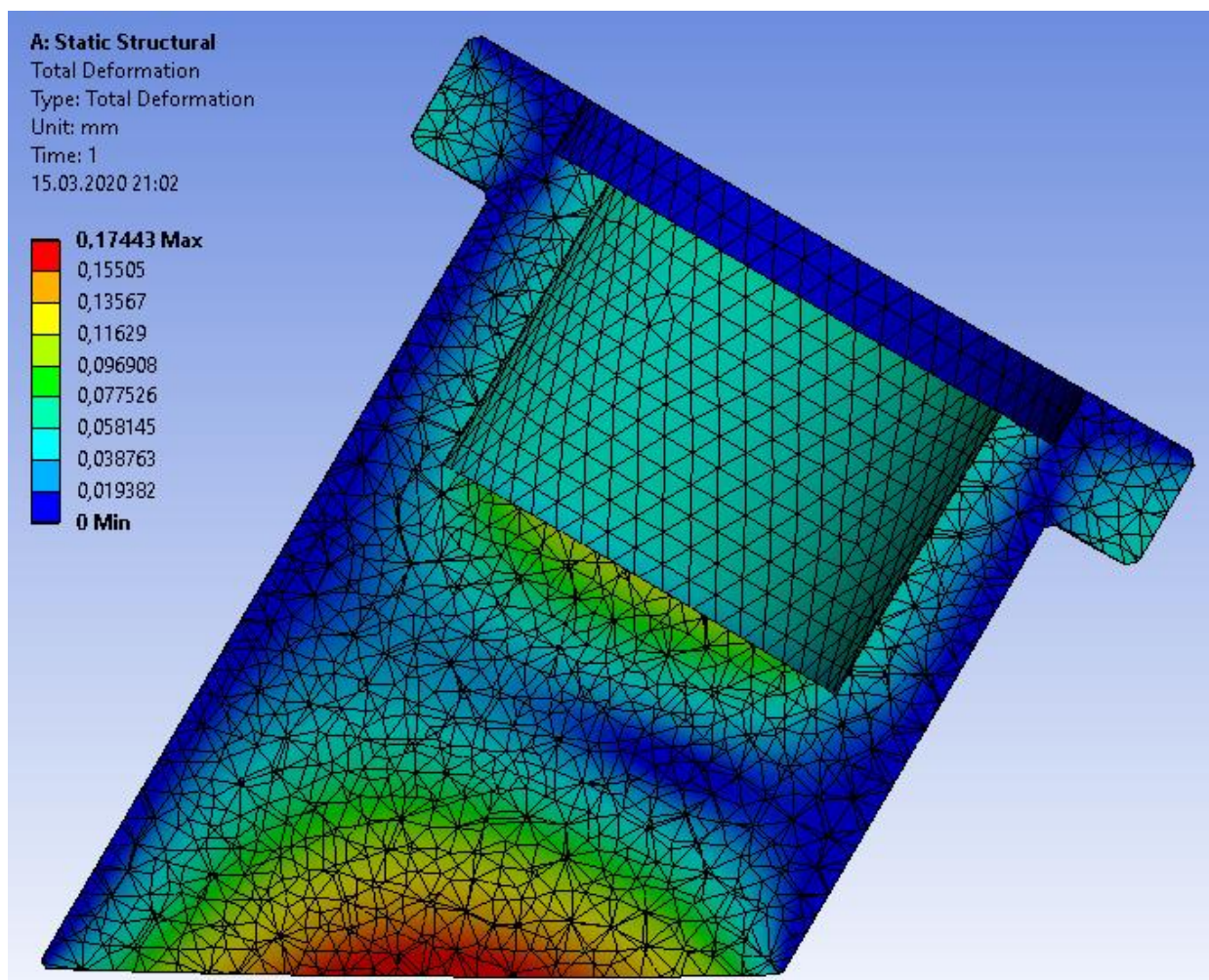
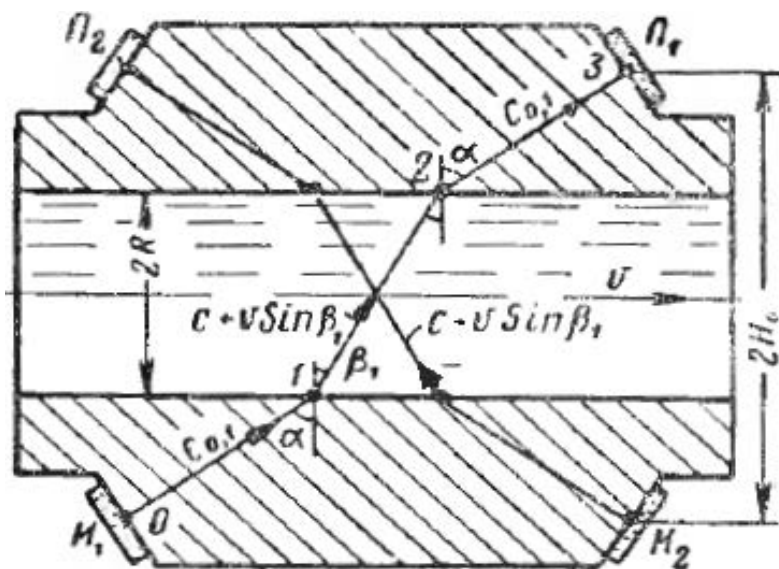


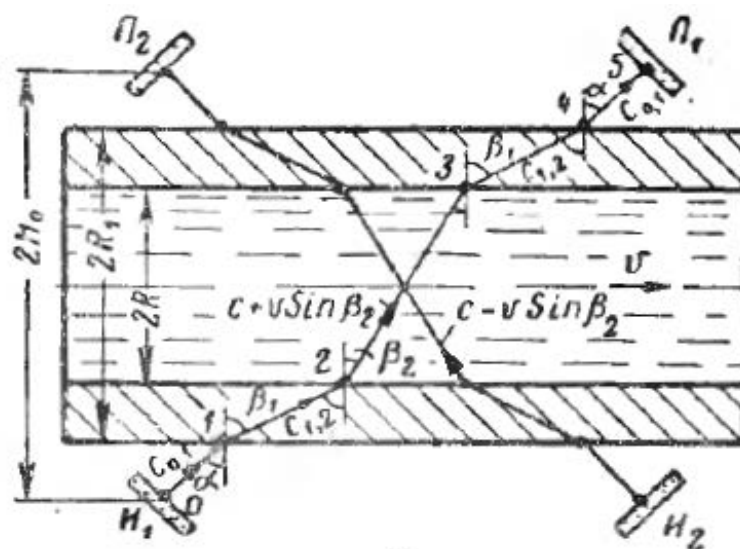
Рисунок 10 – Результаты статического исследования влияния факторов измеряемой среды на стержень камеры: давление 16 атм (1621 кПа) и температура +85 °С

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

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



а)



б)

Рисунок 11 – Схемы двухканальных бесконтактных акустических измерительных преобразователей.

Число преломляющих поверхностей:

а) – одна; б) – две;  $H_1, H_2$  – излучающие пьезоэлементы;  $\Pi_1, \Pi_2$  – приемные пьезоэлементы;  $H_0$  – кратчайшее расстояние от центра пьезоэлемента до оси трубопровода преобразователя;  $R, R_1$  – радиусы преломляющих поверхностей

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата



скорости потока или расхода на единицу измерений. В качестве единицы скорости потока примем 1 м/сек, в качестве единицы расхода – 1 м<sup>3</sup>/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  $\pi$  или  $2\pi$ , 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  $\pm 1$  %.

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  $c_1 = 1503 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  [13]. Также в пункте 3.1 была вычислена средняя

скорость ультразвука в измеряемой среде, равная  $c_2 = 1291 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ , 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  $\alpha$  также должна быть выбрана максимальной для обеспечения высокой чувствительности. Однако, по конструктивным соображениям, не следует осуществлять угол  $\alpha$ , превышающий  $\frac{\pi}{3}$ . В пункте 3.3 по формуле (25) проведен расчет оптимального угла излучения, значение которого равно  $55^\circ$ .

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:

$$\frac{2 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot \sqrt{1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(55^\circ)} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

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:

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

Чувствительность расхода среды:

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

Диапазон измерений для скорости потока:

$$v = \frac{2 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot \sqrt{1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2 \cdot 2\pi \cdot 176,9 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(55^\circ)} = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Диапазон измерений для расхода среды:

$$Q = \frac{2 \cdot 225 \cdot 1503 \cdot 1291 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2\pi \cdot 176,9 \cdot 10^3 \cdot \sin(55^\circ)} = 33,75 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

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  $\alpha$ . 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:

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi f R}{c_2^2} \cdot v \cdot \operatorname{tg}\beta_n, \quad (22)$$

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;

$\beta_n$  – 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:

$$\frac{\Delta\varphi}{D f v} = \frac{4\pi}{c_2^2} \cdot \operatorname{tg}\beta_n. \quad (23)$$

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  $\beta_n$ .

Угол излучения  $\alpha$ , каждый из промежуточных углов и угол в измеряемой жидкости  $\beta_n$  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:



$$\frac{\Delta\varphi_m}{Df v} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{c_2 \cdot c_m \cdot \sqrt{1 - 0,75 \cdot \frac{c_2^2}{c_m^2}}}, \quad (24)$$

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

Вычислим максимальную приведенную чувствительность по формуле (24):

$$\frac{\Delta\varphi_m}{Df v} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{1291 \cdot 1690 \cdot \sqrt{1 - 0,75 \cdot \frac{1291^2}{1690^2}}} = 6,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{рад} \cdot \text{с}}{\text{Гц} \cdot \text{м}^2}.$$

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 условиях достаточно использовать фазовый преобразователь с двумя 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 среды не вызывает изменения разности волновых длин между двумя

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 направлено противоположно 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  $\alpha$ , учитывая условие автоматической компенсации чистоконцентрационных погрешностей. При этом угол  $\alpha$  и любой из углов в промежуточных средах не должны значительно превышать величины  $\frac{\pi}{3}$ .

Условие автоматической компенсации чистоконцентрационных погрешностей:

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

По формуле (25) вычислим оптимальное значение угла  $\alpha$ :

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

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

Условие автоматической компенсации чистотемпературных погрешностей:

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

где  $b_1$  – температурный коэффициент для материала звукопровода,  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ ;

$b_2$  – температурный коэффициент для измеряемой среды,  $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Компенсация осуществляется при определенных значениях  $n$  и любых значениях угла  $\alpha$  в диапазоне  $50 - 70^\circ$ . 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  $b_2$ .

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

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

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

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

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  $\Delta t_{max}$  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.

$$\Delta t_{max} = \frac{0,01 \cdot (1 - n^2 \sin^2 \alpha)}{b_1 + b_2 \cdot (1 - 2 \cdot n^2 \sin^2 \alpha)} ; \quad (27)$$

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

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

$$|\delta\varphi_{t_0}| = \frac{0,0023 \cdot 10^{-3} + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 2 \cdot 0,86^2 \sin^2(55^\circ))}{1 - 0,86^2 \sin^2(55^\circ)} \cdot 2 \cdot 127,97 =$$

$$= 0,0012 \text{ рад.}$$

4. Проведем расчет величины максимально допустимых колебаний концентрации  $\Delta q_{max}$  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.

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

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

$$\Delta q_{max} = \frac{10^{-18} \cdot (1 - 0,86^2 \sin^2(55^\circ))}{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 2 \cdot 0,86^2 \sin^2(55^\circ))} = -1,501 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$|\delta\varphi_{q_0}| = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 2 \cdot 0,86^2 \sin^2(55^\circ))}{1 - 0,86^2 \sin^2(55^\circ)} \cdot 2 \cdot (-1,501) = 0 \text{ рад.}$$

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:

$$\delta c_{2_{max}} = \frac{0,02 \cdot c_2^2 \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha}}{\omega \cdot D}; \quad (31)$$

$$\delta c_{1_{max}} = \frac{0,02 \cdot c_1^2}{\omega \cdot l}. \quad (32)$$

$$\delta c_{2_{max}} = \frac{0,02 \cdot 1291^2 \sqrt{1 - 0,86^2 \cdot \sin^2(55^\circ)}}{2 \cdot \pi \cdot 176,9 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 0,424 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$



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

$$\delta\alpha_{\max} = \frac{0,04 \cdot c_1 \cdot \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \alpha)^3}}{\omega \cdot n \cdot D \cdot \sin 2\alpha}. \quad (34)$$

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

Расчеты показывают, что требования к жесткости и точности изготовления конструкции достаточно высоки и перекося каналов вследствие механической или тепловой деформации не должен превышать нескольких десятитысячных долей радиана. Поэтому следует в качестве материала для труб выбрать нержавеющей 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.

$$r \geq 1 \div 2 \frac{c_{\text{п}}}{f}, \quad (35)$$

где  $c_{\text{п}}$  – 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:

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

$$r \geq 16,39 \text{ мм.}$$

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).

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

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  $\alpha_0$ , 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:

$$\frac{H_0 - 0,5 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{16,5 \cdot 10^{-3}} \geq 2 \cdot 1,3 \cdot \cos(55^\circ);$$



$$H_0 \geq 49,36 \text{ мм.}$$

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

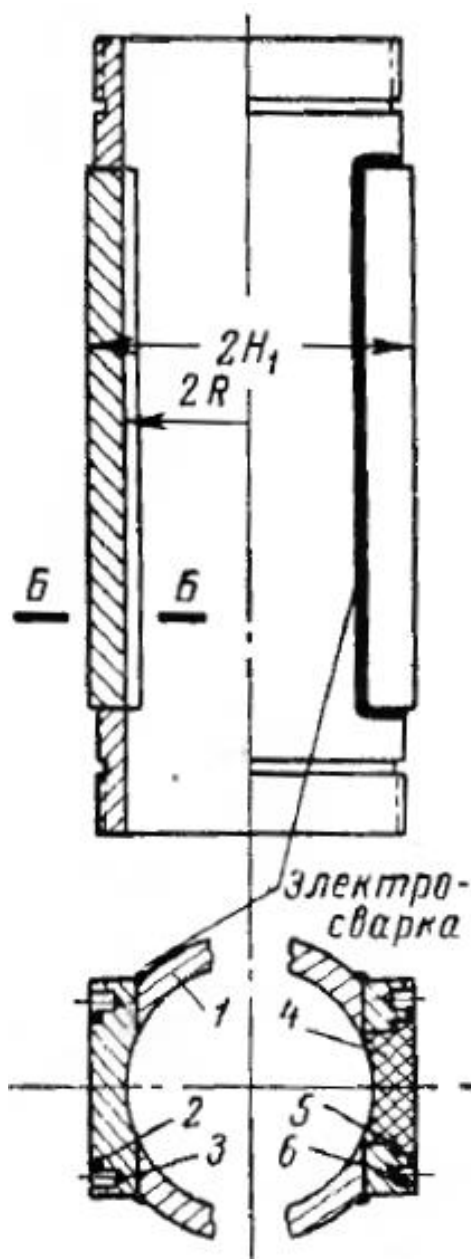


Рисунок 12 – Схематический чертеж корпуса преобразователя с двумя преломляющими поверхностями с плоской внешней преломляющей поверхностью при диаметрах трубопровода менее 100 мм

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист

53

Прохождение ультразвуковых волн при этом осуществляется через стальную накладку  $b$ , сваренную в трубопровод  $l$  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  $H_{0_{\text{мин}}} - R_1$ , то есть расстояние от центра пьезоэлементов до внешней стороны стальной накладки, определяется следующим выражением:

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

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).

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

$$R_1 = 32,74 \text{ мм.}$$

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

$$b_4 = R_1 - R, \quad (38)$$

где  $b_4$  – минимальная толщина стальной накладки, м.

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

$$b_4 = 7,74 \text{ мм.}$$

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

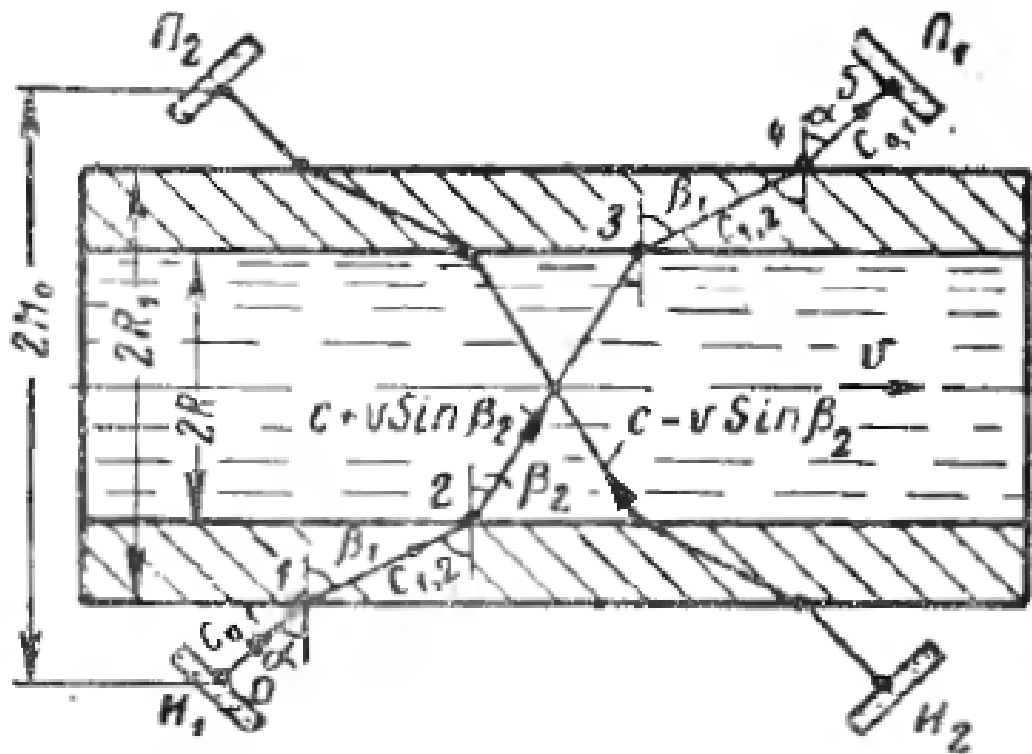


Рисунок 13 - Схема двухканального бесконтактного акустического измерительного преобразователя.

$И_1, И_2$  – излучающие пьезоэлементы;  $П_1, П_2$  – приемные пьезоэлементы;  $H_0$  – кратчайшее расстояние от центра пьезоэлемента до оси трубопровода преобразователя;  $R, R_1$  – радиусы преломляющих поверхностей

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

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

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

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

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

$\beta_1$  – это угол между нормалью к оси трубопровода и лучом ультразвуковой волны, проходящей через стальную накладку (Рисунок 13), рад;

$\beta_2$  – это угол между нормалью к оси трубопровода и лучом ультразвуковой волны, проходящей через измеряемую среду (Рисунок 13), рад.

Значение угла  $\beta_1$  найдем по формуле:

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

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

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

$$\beta_1 = 67,7^\circ.$$

Значение угла  $\beta_2$  найдем по формуле [6]:

$$\sin\beta_2 = \frac{c_2}{c_1} \cdot \sin\alpha. \quad (43)$$

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

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

Тогда:

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

$$l_{1,2} = l_{3,4} = 18,89 \text{ мм.}$$

$$l_{2,3} = \operatorname{tg}(44,99^\circ) \cdot 50 \cdot 10^{-3};$$

$$l_{2,3} = 49,98 \text{ мм.}$$

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

$$L = 87,76 \text{ мм.}$$

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.

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

Таблица 1

Угол излучения, °	Минимальная рабочая частота, Гц	Чувствительность скорости, рад * с/м	Чувствительность расхода, рад * с/м <sup>3</sup>	Диапазон измерений для скорости, м/с	Диапазон измерений для расхода, м <sup>3</sup> /с	Максимально допустимые колебания температуры среды, °	Минимальный радиус пьезоэлемента, мм	Минимальное расстояние от центра пьезоэлемента до оси трубы, мм
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

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  $\alpha$  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  $\alpha$ , не равном рассчитанному, не обеспечивается необходимый диапазон изменений температур, заданный по техническому заданию.

Дополнительно проведем сравнительный анализ зависимости погрешности измерений прибора от значения угла  $\alpha$  с помощью формул (14) – (18). Значение качества 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,

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.



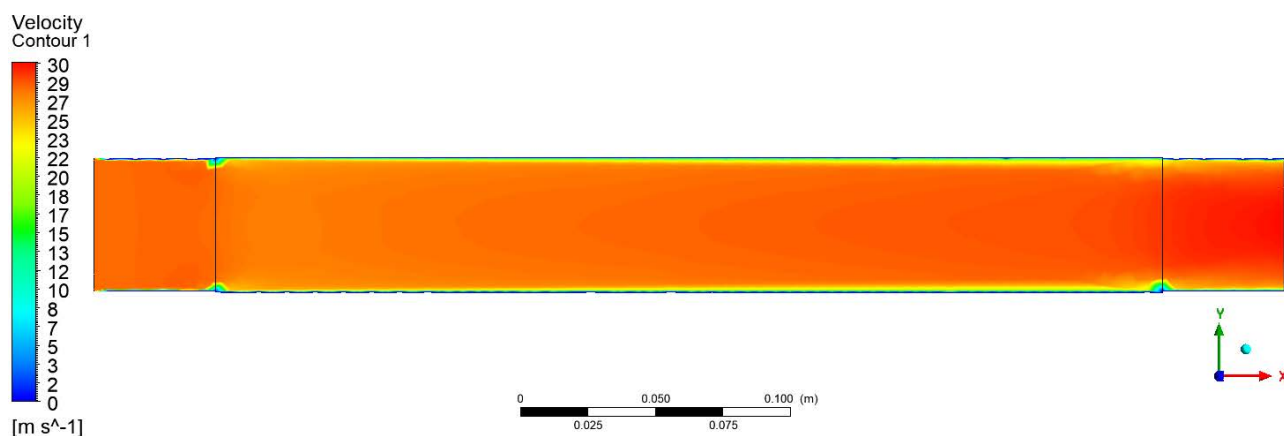


Рисунок 14 – Результаты исследования на перепад скорости для разрабатываемого трубопровода: контур скоростей при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °С

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

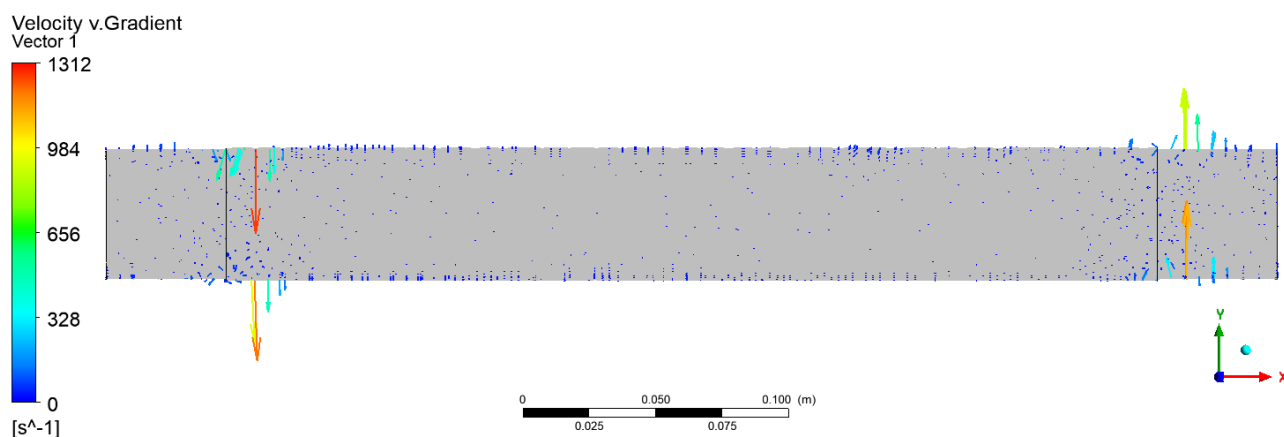


Рисунок 15 – Результаты исследования на перепад скорости для разрабатываемого трубопровода: проекция градиента скорости на ось  $Y$  при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °С

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

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.

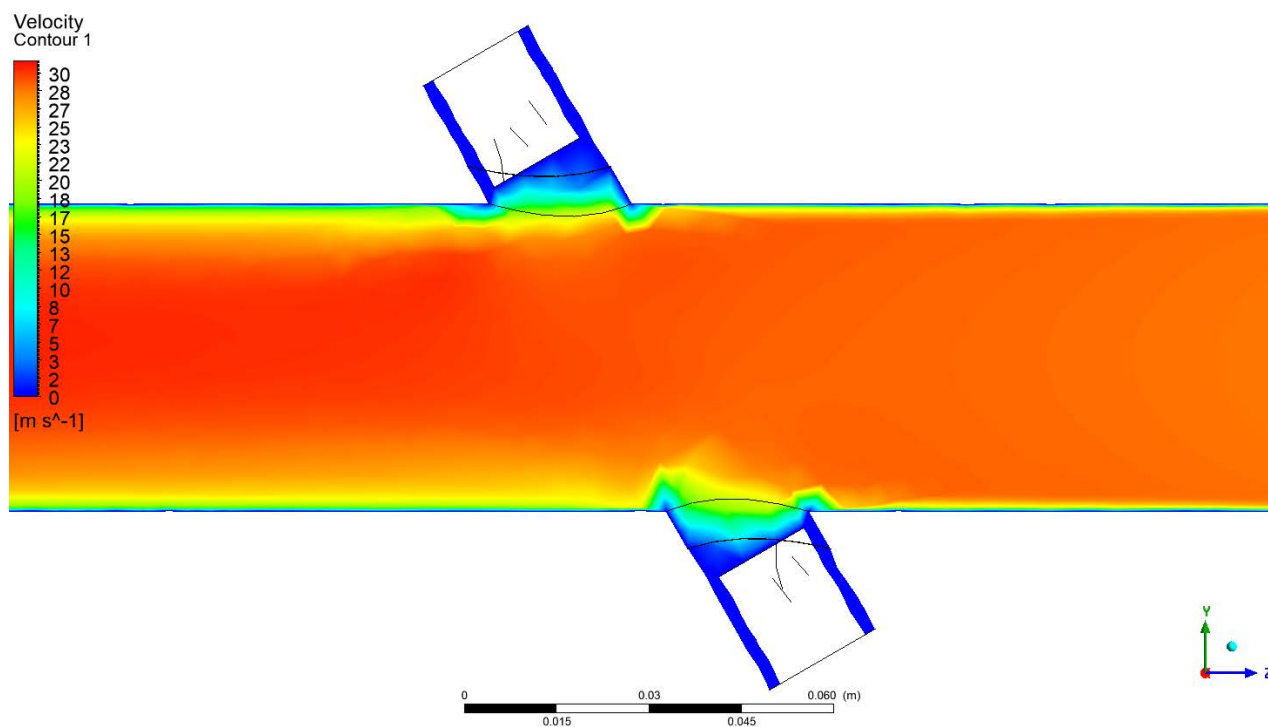


Рисунок 16 – Результаты исследования на перепад скорости для трубопровода с «карманами»: контур скоростей при максимальной скорости среды и температуре среды +85 °С

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

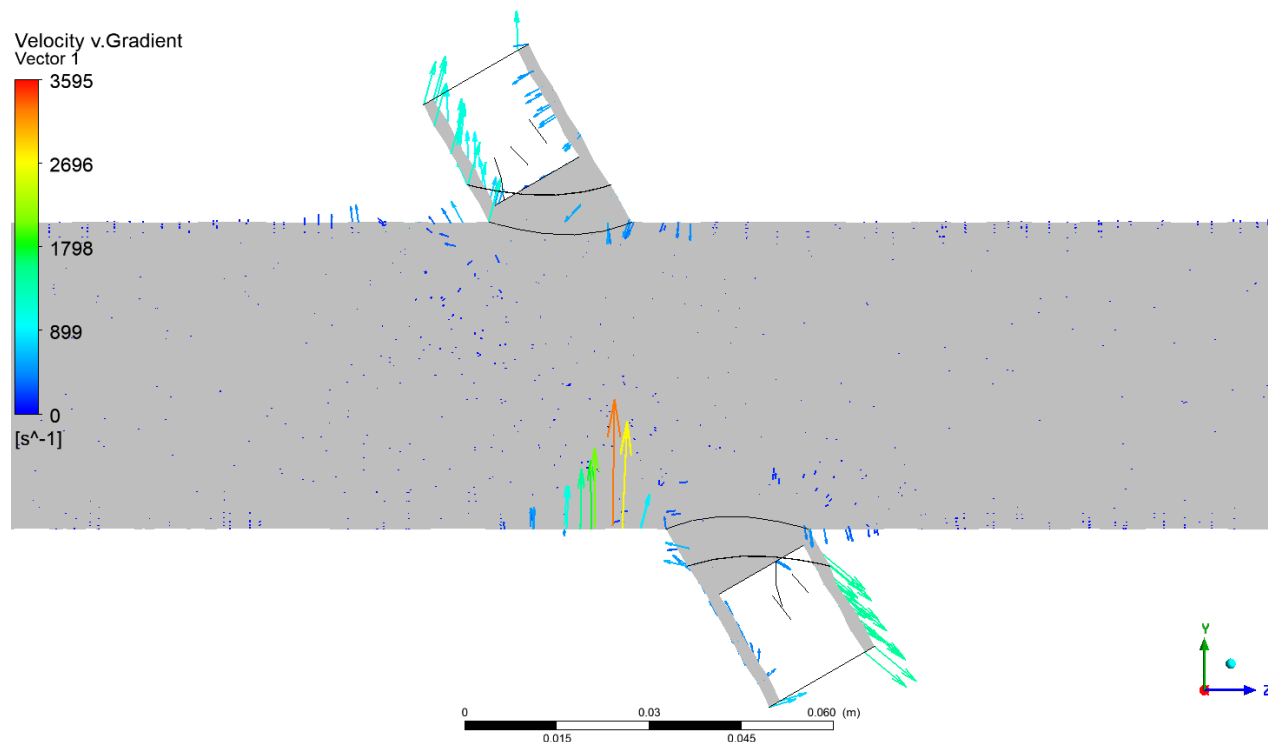


Рисунок 17 – Результаты исследования на перепад скорости для трубопровода с «карманами»: проекция градиента скорости на ось  $Y$  при максимальной скорости среды и температуре среды  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$

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 %.

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.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64



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 контакт нулевой обкладки 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].

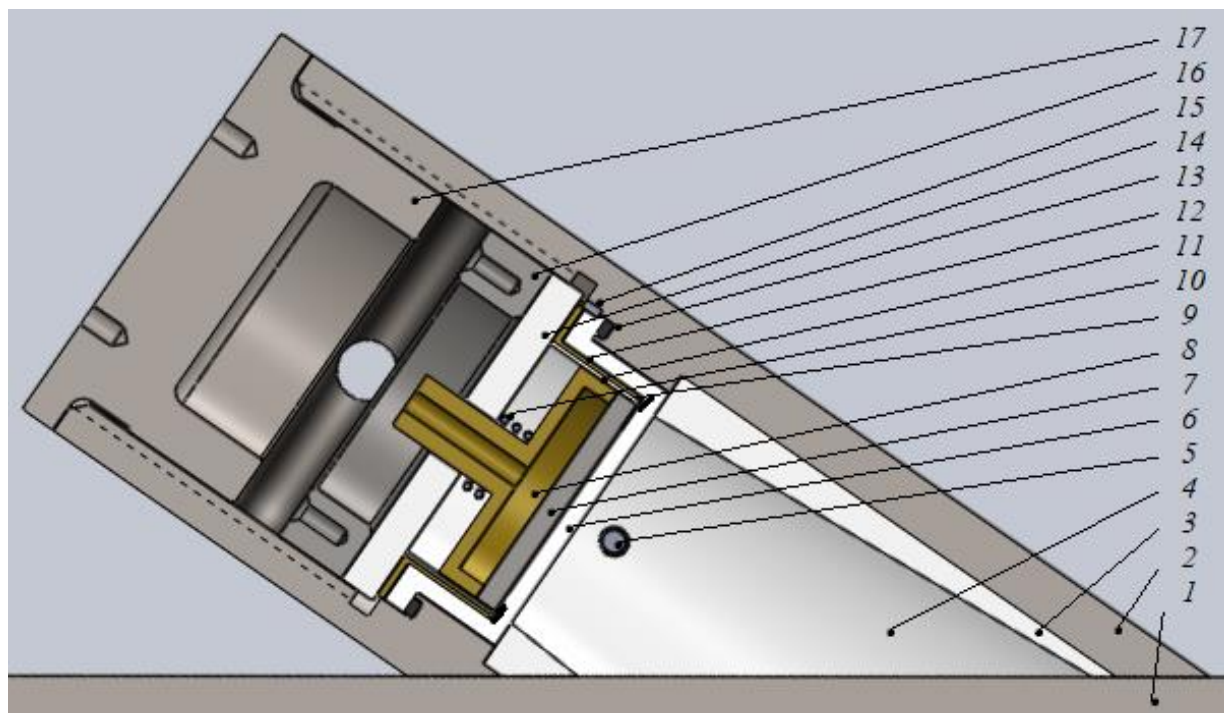


Рисунок 18 – 3D-модель акустической камеры

## 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 12X18H10T 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.

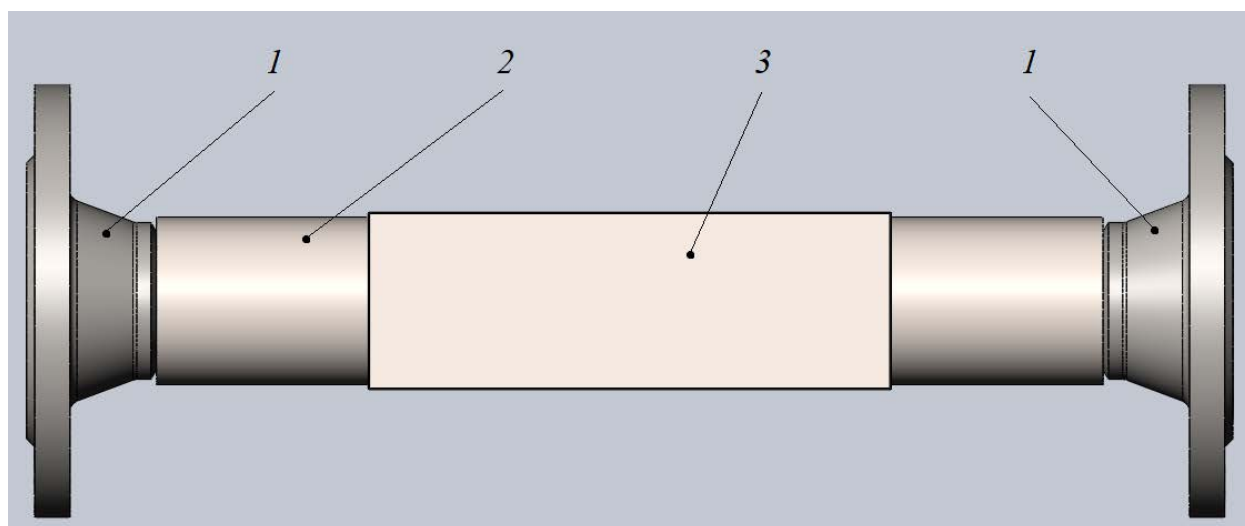


Рисунок 19 – 3D-модель мерного участка:

1 - фланец 50-16-11-1-F-Ст 25-IV ГОСТ 33259; 2 – труба 62x6 – 12X18H10T 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

кронштейну 5 приварен фланец 7, который соединен с ответным фланцем 8 резьбовым соединением, состоящим из четырех винтов М6-6gx10 ГОСТ 11738-84 6 [28]. Электронно-измерительный блок 10 соединен с фланцем 8 с помощью штуцера 9.

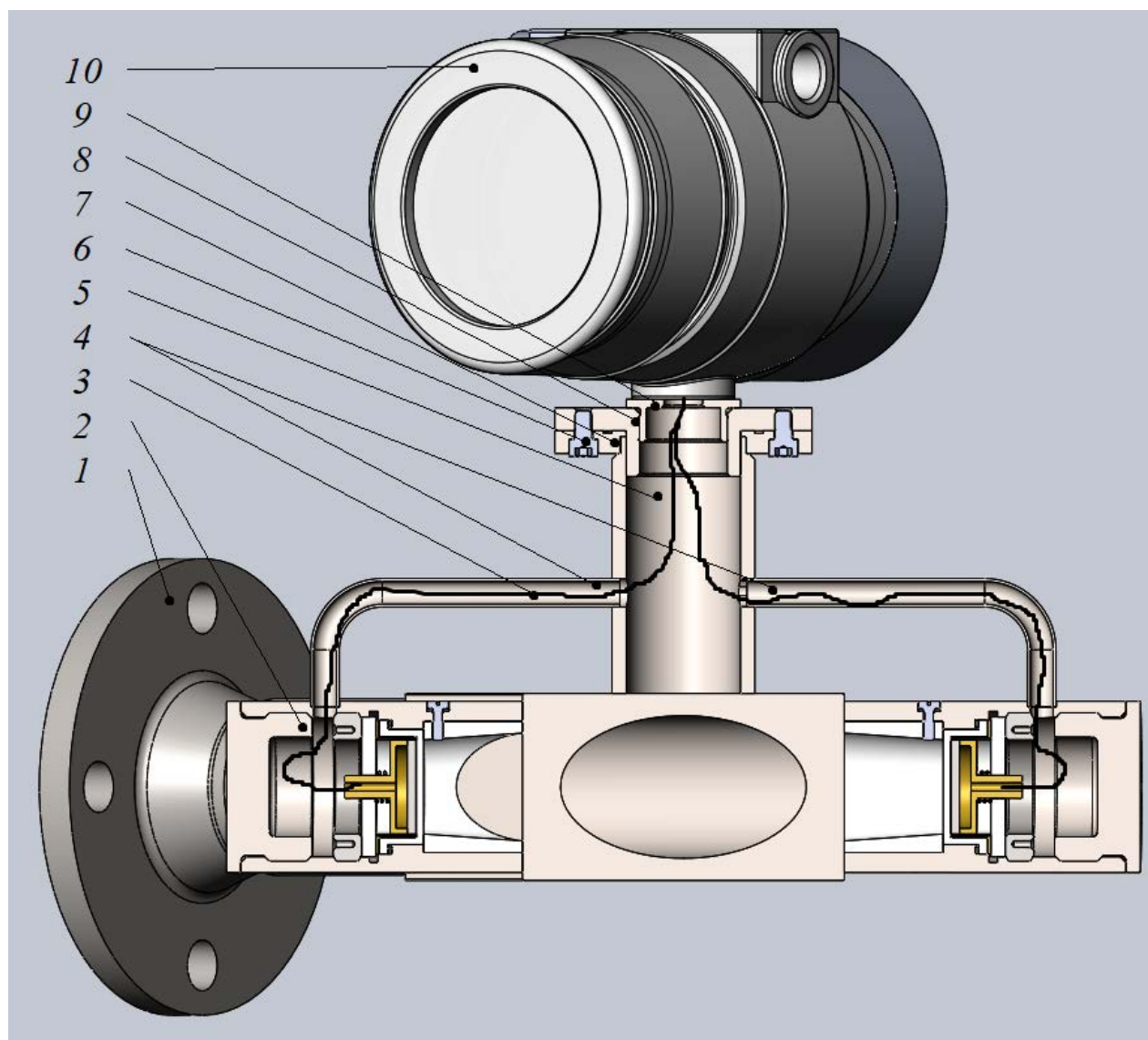


Рисунок 20 – 3D-модель преобразователя расхода в разрезе

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].

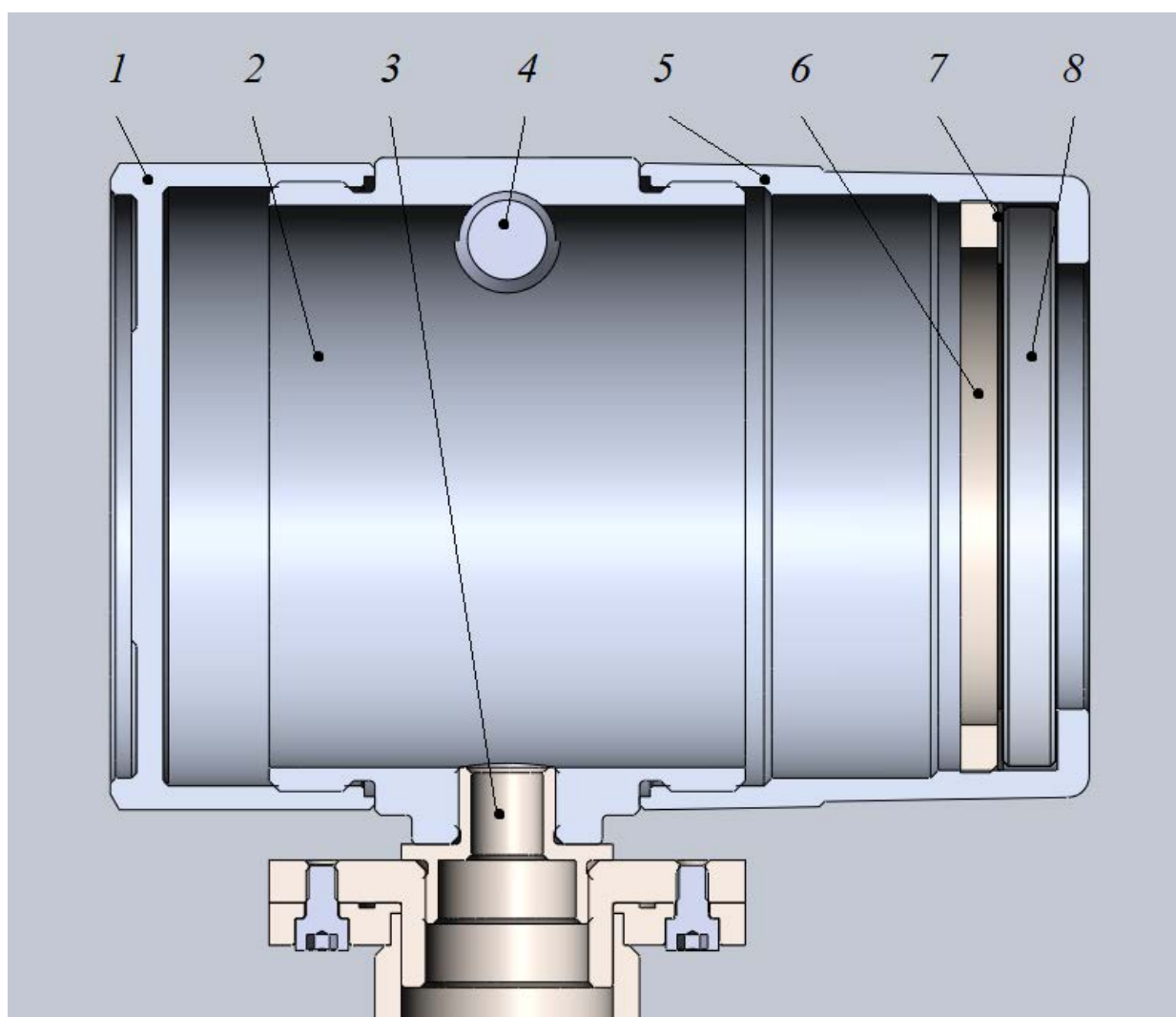


Рисунок 21 – 3D-модель электронно-измерительного блока в разрезе

Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата

ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР

Лист

69

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

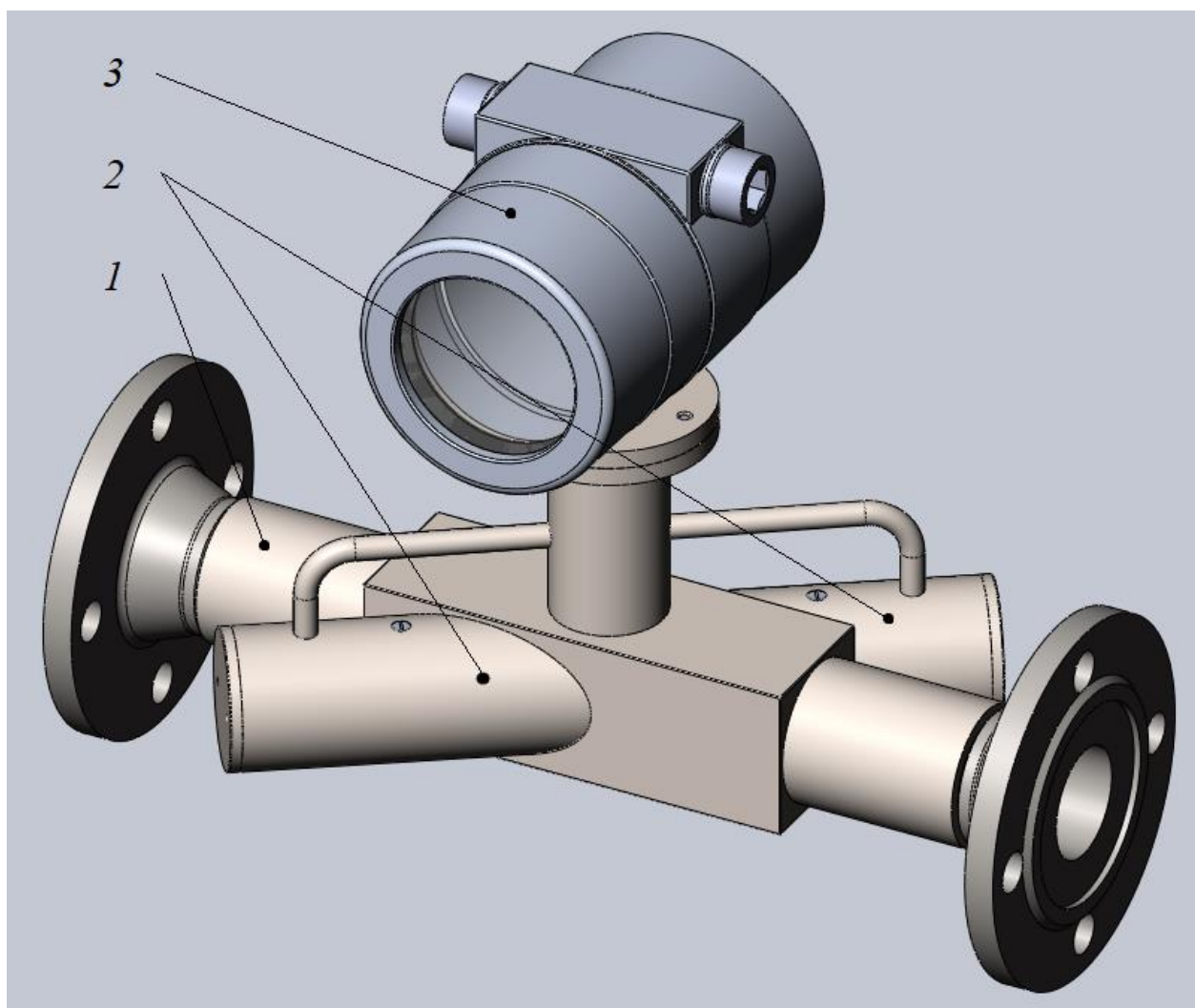


Рисунок 22 – 3D-модель преобразователя расхода:

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

Лист

70

**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.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		71

## 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
										72
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР</i>					

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

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.284 ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		73



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\\_pos\\_hemu\\_penitsya/](https://oilcool.ru/article/kompressornoe_maslo_kakoe_i_skolko_lit_chem_zamenit_pos_hemu_penitsya/).

13. 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 конструктора-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://avroga-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](https://www.atago.net/ru/pdf/parfect_guide/oil-guide-industrial_ru_v01.pdf).

17. Расходомеры-счетчики газа ультразвуковые ЭлМетро-Флоус (ДРУ). Руководство по эксплуатации. – [https://elmetro.ru/netcat\\_files/userfiles/DRU/ELMETRO-Flous\\_DRU\\_-\\_Rukovodstvo\\_po\\_expluatatsii\\_v2.5.pdf](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.: Стандартиформ, 2006. – 8 с.

20. ГОСТ 9833-87. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Конструкция и размеры. – М.: Изд-во 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.

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