

**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-измерительной техники**

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_/ А.Л. Шестаков /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

---

Влияние геометрических параметров тел обтекания на результаты измерения расхода газа ротаметром

---

(наименование темы работы (проекта))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**ЮУрГУ-12.03.01.2019. 306 ПЗ ВКР**

(код направления/специальности, год, номер студенческого)

**Руководитель, д.т.н., профессор**

\_\_\_\_\_/ С.Г. Некрасов /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Автор**

студент группы КЭ – 463

\_\_\_\_\_/ А.И. Багаева /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Нормоконтролер, доцент**

\_\_\_\_\_/ А.С. Волосников /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## АННОТАЦИЯ

Багаева А.И. Влияние геометрических параметром тел обтекания на результаты измерения расхода газа ротаметром. – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН, КЭ-463; 77 с. 42 илл., библиогр. список – 33 наим.

В процессе выполнения дипломной работы был проведен аналитический обзор литературы, выявлены функциональные особенности работы ротаметра и возможности учебного стенда по изучению его работы. Произведены измерения расхода газа на учебном стенде способом постоянного перепада давления и построена функция преобразования ротаметра.

В рамках дипломной работы была разработана виртуальная модель течения газа в трубке ротаметра в среде Flow Simulation, при этом в результате сравнения экспериментальных и численных данных был определен диаметр поплавка ротаметра и площадь его поперечного сечения. В работе рассчитано влияние на метрологические характеристики ротаметра его геометрических размеров и свойств текущего газа.

					<b>ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Багаева А.И.</i>				<b>ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЛ ОБТЕКАНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА РОТАМЕТРОМ</b>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проз.</i>	<i>Некрасов С.Г.</i>						4	76
<i>Н.контр.</i>	<i>Волосников А.С.</i>				<b>ЮУрГУ Кафедра ИНИТ</b>			
<i>Утв.</i>	<i>Лапин А.П.</i>							

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	8
1.1 История развития расходомерии .....	8
1.2 Современное состояние расходомерии .....	9
1.3 Выводы, основные задачи исследования .....	12
2. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ.....	14
2.1 Поплавковый ротаметр .....	14
2.2 Модификация и типы ротаметров.....	16
2.3 Поплавки и трубки ротаметров .....	18
2.4 Поршневой расходомер .....	20
2.5 Анализ типовых погрешностей измерения .....	22
2.6 Стенд учебный СИУ-01 .....	28
3 ОБЗОР ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ .....	35
3.1 CAD/CAM/CAE-системы.....	35
3.2 История развития мирового рынка CAD/CAM/CAE-систем .....	35
3.3 Общая международная классификация CAD/CAM/CAE-систем .....	37
3.4 Пакет ANSYS .....	38
3.5 Модернизация Ansys .....	40
3.6 Конечно-элементный анализ .....	41
3.7 Интерфейс SolidWorks Flow Simulation.....	43
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....	47
4.1 Создание геометрической модели .....	47
4.2 Создание конечно-элементной модели .....	49
4.3 Идентификация параметров поплавка ротаметра .....	55
4.4 Оценка влияния вязкости, плотности и температуры на точность измерений ротаметра .....	64
4.5 Чувствительности ротаметра по вязкости, плотности и температуре.....	69
4.6 Погрешности ротаметра при случайном изменении вязкости, плотности и температуры .....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	75

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР				

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с развитием промышленности всё большее значение приобретают расходомеры жидкости и газа.

Они необходимы прежде всего для управления производством. Без расходомеров нельзя обеспечить оптимальный режим технологических процессов во всех отраслях. Эти приборы требуются также для автоматизации производства и достижения при этом максимальной его эффективности.

Так как изменение температуры воздуха существенно влияет на вязкость и плотность, то современные требования к расходомерам многообразны. Одним из главных требований является необходимость измерения расхода не только в нормальных условиях, но и в экстремальных, например, при очень низкой температуре  $-55^{\circ}\text{C}$ , такой как на южном полюсе и атмосферном давлении ниже нормы на 150 мм. рт. столба. Такие условия создают дополнительные трудности для обеспечения точного измерения расхода.

Расходомерами постоянного перепада давления называются приборы, чувствительный элемент которых воспринимает динамическое давление потока и перемещается под его воздействием, причем величина перемещения зависит от расхода. У большинства расходомеров обтекаемое тело (поплавок, диск, поршень) перемещается прямолинейно, обычно вдоль своей вертикальной оси. Но имеется группа приборов, у которых обтекаемое тело (лопасть, диск) поворачивается вокруг оси подвеса.

**Актуальность** работы заключается в изучении параметров, влияющих на точность и чувствительность ротаметра. Данные метрологические характеристики расходомера позволят понять степень влияния физических параметров на формирование величины погрешностей, следовательно полученные результаты повысят уровень теоретических знаний и профессиональных навыков подготовки специалистов в этом направлении.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

**Целью работы** является исследование влияния параметров конструкции и газа на точность измерения расхода на основе метода постоянного перепада давления.

В связи с поставленной целью в работе решались **следующие задачи:**

1. Аналитический обзор литературы. Постановка задач исследования.
2. Анализ параметров ротаметра для измерения расхода жидкостей и газа.

Типовые погрешности измерений.

3. Выбор системы имитационного моделирования для расчета течения газа в мерной части ротаметра.

4. Разработка численной модели и ее верификация на основе экспериментальных данных.

5. Параметрическое исследование метрологических характеристик ротаметра.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		





направлению течения потока и против него. Данный метод получил наибольшее распространение в современных датчиках за счет высокой точности и малой “инерционности” измерений в любых средах с малым содержанием примесей, газов и прочих включений. На отечественном рынке можно выделить следующие модели: Micronics Portaflow МКП-R, Panametrics PT868, Krohne LT860, Сингур АКРОН-01 [22, с.52].

Сравнительно недавно начали использовать ультразвуковые корреляционные расходомеры, в основе этих работ заложено зависимость изменений сигналов в жидкости и газах. Посылка сигналов в поток вещества и измерение соответствующего «отклика» позволяет получать информацию в виде изменения амплитуды, изменения фазы или частоты из-за наличия возмущений в потоке. Путем подачи сигнала в две секции трубы, расположенные на известном расстоянии друг от друга, можно получить два разных сигнала, разделенных во времени интервалом, равным времени прохождения многофазного потока между указанными секциями. Примеры таких устройств на основе электромагнитного несущего сигнала приведены в патентных документах US 44022CO, US 4459958, US 4201083, US 4976154, W0 94 / 17373, US 6009760 и US 5701083 [22, с.34].

Необходимо отметить, что ультразвуковые методы характеризуются и значительными отрицательными факторами например такие как зависимость собственной скорости ультразвуковых колебаний от свойств измеряемой среды; скорость потока при измерении усредняется не по сечению трубы, а вдоль направления излучения, что вынуждает снабжать конструкцию дополнительными датчиками или отражателями. Важными также являются погрешности, вызванные изменением температуры и концентрации среды; погрешности от несимметричности акустического канала; реверберационные, обусловленные наличием отражений; гидродинамические, где отклоняется скорость потока от расчетной. Очевидными являются и достоинства: неинтрузивность и высокое быстродействие, отсутствие подвижных элементов.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



Необходимо, чтобы многофазные расходомеры обладали сравнительно высокой точностью (допустимая погрешность для каждой фазы не более  $\pm 5\%$  расхода) и надежностью, не зависели от режима течения потока и были пригодными в широком диапазоне содержания компонентов. Расходомер должен надежно работать в коррозионной среде, находясь, например, ниже уровня моря, при этом скорость течения потока может достигать 50 м/с при давлении более  $10^8$  Па и температуре выше  $200^\circ\text{C}$  и, кроме того, песок и другой абразив не должен привести к износу измерительной полости преобразователя.

В настоящее время на рынке многофазные расходомеры делятся на 3 класса [22, с.67]:

- 1) Устройства на основе принципа частичного разделения фаз;
- 2) Стационарные расходомеры;
- 3) Виртуальные расходомеры.

Ниже приведены описания каждого из этих типов расходомеров [22, с.50].

**Частично разделенные расходомеры.** Для этого типа расходомера используется частичное разделение потока газа или жидкости с компактным сепаратором. Такие сепараторы сообщают жидкости или газу тангенциальное ускорение, которое составляет приблизительно 15-100 г. Универсальный расходомер используется для измерения потоков, состоящих из газа или жидкости. Следовательно, такой расходомер дешевле стационарного, описанного ниже.

**Стационарные расходомеры.** На этом этапе делается попытка измерить три отдельных притока: скорость потока нефти, воды и природного газа без разделения фаз, хотя некоторые производители доводят поток до желаемых параметров. Необходимо сделать несколько измерений, чтобы получить скорость движения отдельных фаз. Эта технология самая компактная и дорогая. Если газы удаляются, компактное разделение можно использовать для расширения диапазона режимов работы стационарных расходомеров.

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР				

**Виртуальные расходомеры.** Этот метод появился в последние годы. Это новая задача, используемая совместно с физическим измерительным прибором или при его отсутствии. В виртуальных расходомерах применяется некоторое возможное давление и измеряется некоторая температура для оценки расхода жидкости, она основана на моделях труб с многофазными потоками жидкости. Этот метод не был проверен на точность, и только несколько таких технологий официально доступны.

**Квалиметрия. Цена/Восприятие цены.** В отрасли сложилось представление, что эта технология очень дорогостоящая. Однако инженерам по технической эксплуатации оборудования, для которых привычным делом является закупка турбины или диафрагменного расходомера, приходится платить за них больше. Часто не учитывается возможная экономия от применения измерителя расхода многофазного потока. Эта экономия весьма существенна, если учесть затраты на другое оборудование, подготовку и обучение персонала, установку и техобслуживание. За последние несколько лет стоимость многофазных расходомеров снизилась, поскольку поступление заказов на сотни этих измерителей дает возможность снижать их себестоимость за счет роста производства. Раньше эти устройства изготавливали в основном по индивидуальным заказам, и производственные издержки были очень высокие [31, с.31].

### 1.3 Выводы, основные задачи исследования

Проведенный аналитический обзор литературы показывает, что расходомеры постоянного перепада давления занимают существенную нишу на мировом рынке расходомеров, обладая простотой конструкции, дешевизной и сравнительно высокой точностью измерения. Всё это заставляет в учебных целях рассматривать такие устройства с целью понимания принципа работы и способов повышения точности измерений с учетом влияющих величин. Отсюда следуют следующие задачи исследования:

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

1. Анализ параметров ротаметра для измерения расхода жидкостей и газа. Типовые погрешности измерений.
2. Выбор системы имитационного моделирования для расчета течения газа в мерной части ротаметра.
3. Разработка численной модели и ее верификация на основе экспериментальных данных.
4. Параметрическое исследование метрологических характеристик ротаметра.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

## 2. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

В настоящее время большое распространение среди приборов, основанных на методе постоянного перепада давления, имеют поплавковые ротаметры. Они занимают около 10% от всех расходомеров.

### 2.1 Поплавковый ротаметр

Рассмотрим процессы, происходящие в конической трубке ротаметра [16, с.5].

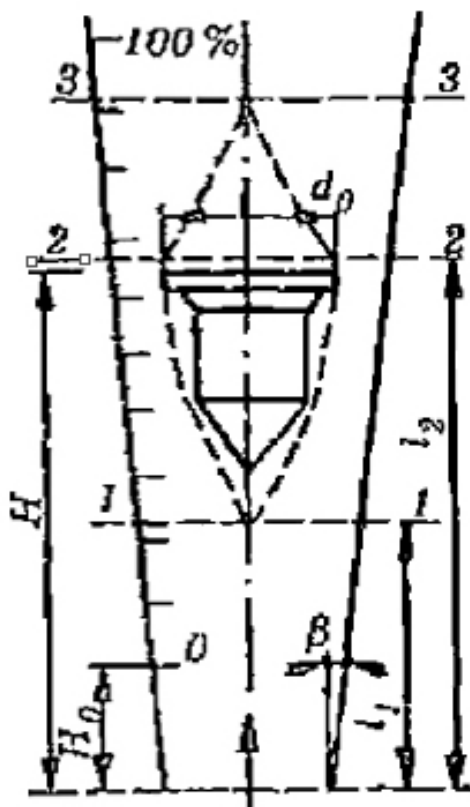


Рисунок 2.1 – Схема типового поплавкового ротаметра

На рисунке 2.1 представлена схема поплавкового ротаметра. В ротаметре можно выделить три сечения: сечение 1-1 где начинает сказываться возмущающее действие поплавок на поток; 2-2 – узкое кольцевое сечение потока, где имеется максимальная скорость; 3-3, в котором кончается возмущающее действие поплавок на поток.

На поплавок снизу действуют три силы: разность статических давлений на носовую и кормовую поверхности поплавок, возникающая вследствие перехода части потенциальной энергии в скорость  $v_k$  в узком сечении 2-2; эта разность равна  $(p_1 - p_2)f$ , где  $f$  – площадь наибольшего поперечного сечения поплавок; динамическое давление  $W$  потока, определяемое по формуле:

$$W = c \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \frac{f}{2} \quad (1)$$

где  $c$  – коэффициент сопротивления поплавок;  $\rho$  и  $v$  – плотность и характерная скорость потока соответственно; сила трения  $N$  потока о поверхность  $f_0$  поплавок.

Сумма этих трех сил уравнивается весом  $G$  поплавок

$$G = V \cdot g \cdot \rho_{\text{п}} \quad (2)$$

где  $V$  и  $\rho_{\text{п}}$  – объем и плотность материала поплавок.

Из уравнения следует, что

$$p_1 - p_2 = (G - W - N)/f \quad (3)$$

Если пренебречь силами  $W$  и  $N$ , то получаем, что  $p_1 - p_2 = \frac{G}{f} = \text{const}$ . Это послужило основанием считать ротаметр расходомером постоянного перепада давления. Но это постоянство лишь приближенное, потому что с увеличением расхода возрастают как динамическое давление  $W$ , так и сила трения  $N$ .

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Следовательно, с увеличением расхода перепад давления  $p_1 - p_2$  на поплавке должен уменьшиться, хотя общий перепад на ротаметре с учетом потери в присоединительных штуцерах при этом возрастает. Опыт полностью подтверждает сказанное.

## 2.2 Модификация и типы ротаметров

Благодаря простоте своей конструкции, надежности и точности в эксплуатации ротаметры применяются в различных отраслях, как в научных исследованиях, так и в промышленности.

Ротаметры устойчивы к агрессивным средам, имеют возможность измерения расхода слабозагрязненных жидкостей с дисперсными включениями инородных частиц, обладают достаточно высокой чувствительностью, незначительной, почти постоянной, потерей давления и постоянной погрешности при значительном диапазоне измерения расхода.

Разновидностей ротаметров выделяют несколько: они различаются сферой применения и рабочей средой. Одни модели подходят для измерения объемного расхода агрессивных жидкостей и газов, другие – для неагрессивных. Отдельные модели предназначены для использования на судах и кораблях речного и морского флота.

Различие в условиях эксплуатации находит свое отражение в конструкции приборов и материалах, из которых они изготовлены.

Модели ротаметров могут обладать различным функционалом. В некоторых вариантах предусмотрена возможность дистанционной передачи полученных данных о расходе исследуемой среды. В таком случае информация переводится в унифицированный пневматический сигнал и передается на другое устройство.

В России в настоящее время изготавливаются и эксплуатируются ротаметры нескольких видов – ротаметры для местного измерения расхода (тип РМ) и ротаметры с дистанционным измерением, оснащенные вторичными

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

преобразователями «перемещение – электрический сигнал» (тип РЭ) и пневматическими преобразователями (тип РП) [17, с.21].

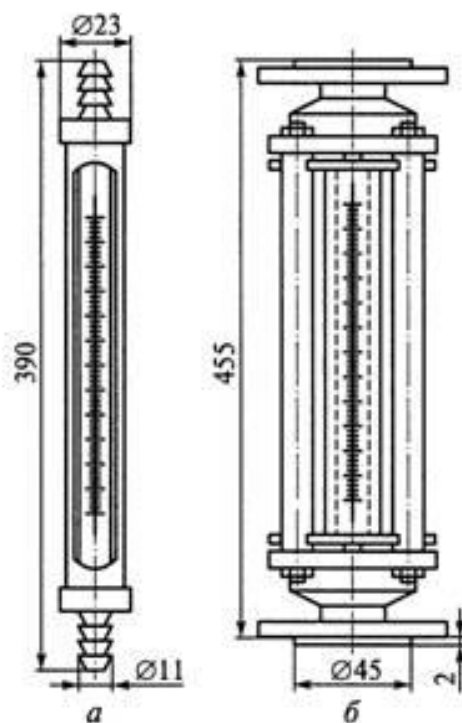


Рисунок 2.2 – Устройство расходомера постоянного перепада давления  
(а) – поплавковый ротаметр; (б) – поршневой ротаметр

Принцип действия ротаметров основан на регистрации изменяющегося проходного сечения отверстия для течения изучаемой среды. Существует поплавковые и поршневые ротаметры [16, с.16].

В первых поток вещества, перемещающийся в конусообразной трубе, поднимает поплавок, пока сечение кольцеобразного промежутка между поплавком и стенками трубки не достигает равновесия между силой воздействия вещества и массовой силой поплавка.

Ротаметры второго типа состоят из цилиндра с прямоугольным отверстием для течения жидкости или газа и перемещающегося поршня. Под действием вещества поршень перемещается и изменяет проходное сечение отверстия до такого размера, при котором сила, воздействующая на поршень и возникающая

вследствие перепада давления до и после отверстия, не уравнивается весом поршня.

Достоинства ротаметров: простота устройства и эксплуатации; наглядность показаний; надежность в работе; удобство применения для измерения малых расходов различных жидкостей и газов; значительный диапазон измерения и достаточно равномерная шкала.

Недостатки: хрупкость и непригодность для измерения расхода веществ, имеющих значительные давления; связанность прибора с местом измерения; только указывающий характер прибора; непригодность для измерения больших расходов.

### 2.3 Поплавки и трубки ротаметров

Основные элементы ротаметра – коническая трубка и поплавков – образуют его проточную часть [16, с.32].

Поплавков – вводящий в заблуждение термин, поскольку он поднимается не от какого-либо плавучего эффекта, а в результате восходящего сопротивления жидкости, которая, в свою очередь, приводит к давлению разниц в поплавке. По мере увеличения потока поплавков поднимается выше в трубке до точки, в которой кольцо, образованное между поплавком и стенкой конической трубы, достаточное, чтобы можно было перетащить поплавков на балансируемый вес поплавка. Затем поток выводится с высоты, до которой поплавков поднялся [1, с.58].

Формы поплавка могут быть весьма разнообразны. Классическая его форма показана на рисунке 2.3а. Поплавков имеет конусную часть, цилиндрическую среднюю часть и дисковый верх. Существенный недостаток рассмотренной формы поплавка – сильная зависимость градуированной характеристики от вязкости измеряемого вещества. Для снижения этой зависимости полезно уменьшить высоту верхней дисковой части поплавка и диаметр цилиндрической

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



его части с тем, чтобы он был не более 0,6-0,7 от диаметра верхнего диска (рисунок 2.3б). В меньшей степени влияние вязкости сказывается при катушечной форме поплавка, показанной на рисунке 2.3в, которая находит теперь основное применение.

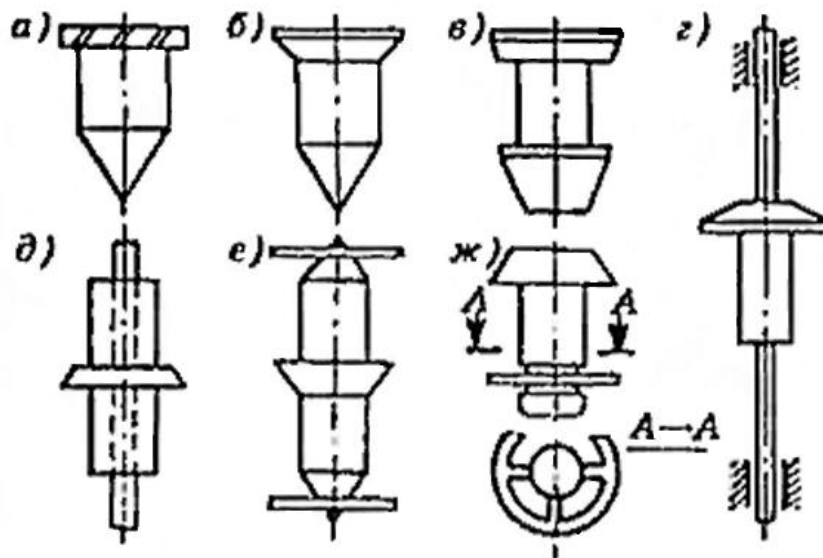


Рисунок 2.3 – Форма поплавков

Еще сильнее влияние вязкости устраняется при дисковой и тарельчатой форме поплавков, когда основное трение потока происходит на очень небольшой боковой поверхности диска. Но вес таких поплавков очень мал и необходимо либо увеличить длину цилиндрического тела поплавка в одну или обе стороны от диска, или же подвешивать на стержне дополнительный груз. Кроме того, такие поплавки неустойчивы и во избежание перекоса и трения о стенку трубки их необходимо снабжать направляющими. Последние могут быть трех видов: направляющие, связанные с поплавком и перемещающиеся вместе с ним (рисунок 2.3г); неподвижные центральные штоки, проходящие через осевые отверстия поплавков (рисунок 2.3д); направляющие кольца (два или одно), укрепляемые обычно в верхней или нижней части поплавков (рисунок 2.3е, ж) [17, с.25].

Поплавки изготавливаются из различных материалов: нержавеющей стали, титана, алюминиевых сплавов, фторопласта-4 и различных пластмасс (в

зависимости от диапазона измерения и агрессивности измеряемого вещества). При необходимости для снижения массы поплавок его делают пустотелым.

В нашем случае рассмотрим, как ведет себя форма поплавок 2.3б.

## 2.4 Поршневой расходомер

Поршневые или золотниковые расходомеры – разновидность расходомеров постоянного перепада давления. В этих приборах роль поплавок выполняет поршень или другой элемент, перемещающийся во втулке с окнами особой формы. Измеряемое вещество поступает под поршень и, приподнимая его, выходит через окно или прорезь во втулке. Давление над поршнем то же, что и в выходном штуцере. Чем больше расход, тем выше поднимается поршень, открывая все большую часть отверстия во втулке. Перепад давления на поршне при этом сохраняется постоянным. Выбирая надлежащий профиль прорези, можно получить желаемую (например, линейную) зависимость между расходом и перемещением поршня.

Существует много разновидностей поршневых расходомеров, но применяются они значительно реже ротаметров и поплавковых расходомеров. В большинстве случаев они имеют одно выходное окно и, следовательно, односторонний выход жидкости. При этом равнодействующая сил давления приложена не в центре площади поршня и возникает момент, прижимающий поршень к той поверхности втулки, в которой расположено выходное окно. Для устранения этого недостатка предложены расходомеры с выходом жидкости через два прямоугольных окна, расположенных на противоположенных поверхностях втулки.

К достоинствам поршневых расходомеров относятся: легкость перехода на другой предел измерения посредством изменения массы груза, действующего на поршень, а также возможность измерения веществ с механическими примесями.

На рисунке 2.4 представлен поршневой расходомер [17, с.32].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

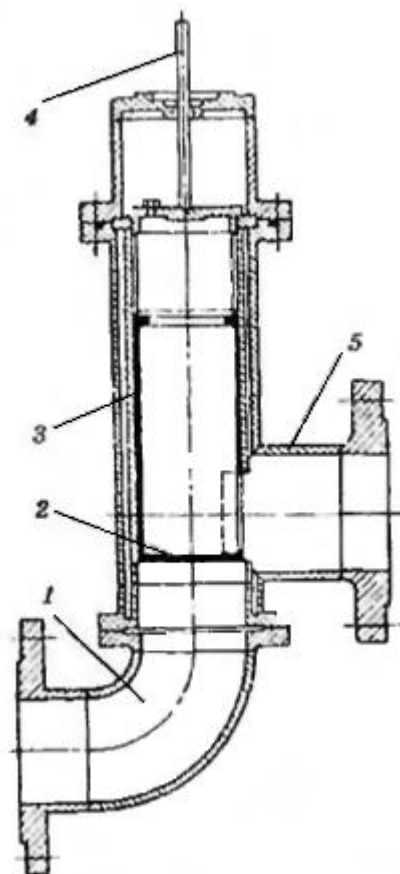


Рисунок 2.4 – Поршневой расходомер

Для достижения практической независимости показаний от изменений плотности  $\rho$  измеряемого вещества плотность поршня  $\rho_{\text{п}}$  в два раза больше, чем  $\rho$ . Конструкция расходомера очень проста. На входном патрубке 1 укреплен цилиндр с втулкой 3, внутри которой перемещается поршень 2, связанный с магнитным стержнем 4; последний воздействует на заслонку у сопла, давление воздуха в котором служит выходным сигналом прибора. Во втулке 3 прорезано окно, через которое измеряемое вещество уходит в выходной патрубок 5. Максимальные расходы 13; 60 и 120 т/ч. Погрешность  $\pm 1,25\%$ . В пределах пятикратного диапазона измерения при вязкости вещества до  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ . Прибор надежен в работе и нечувствителен к твердым частицам в потоке [17, с.44].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

## 2.5 Анализ типовых погрешностей измерения

Применяемые при измерениях методы и средства измерений не являются идеальными, а органы восприятия экспериментатора (оператора) не могут идеально воспринимать показания приборов. Поэтому после завершения процесса измерения всегда остается некоторая неопределенность в информации об объекте измерения, т. е. получить истинное значение физической величины невозможно [7, с.33]. Однако, это понятие введено в теорию измерений, при этом различают истинное и действительное значения измеряемой величины и результат измерения.

*Истинное значение физической величины* – это значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в количественном и качественном отношении соответствующую физическую величину. *Действительное значение физической величины* – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. *Результат измерения* – значение физической величины, полученное путем ее измерения. Результат измерения представляет собой приближенную оценку истинного значения физической величины [8, с.121].

Остаточная неопределенность в информации об объекте измерения может характеризоваться различными мерами неопределенности. В метрологии мерой неопределенности результата измерений является погрешность результата измерения.

Под *погрешностью результата измерения (погрешностью измерения)* понимается отклонение результата измерения  $X$  от истинного (действительного) значения  $Q$  измеряемой величины:

$$\Delta = X - Q, \quad (4)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Погрешность измерения указывает границы неопределенности значения измеряемой величины. Истинное значение физической величины применяется при решении теоретических задач метрологии. На практике пользуются действительным значением. За действительное значение физической величины при однократных измерениях, как правило, принимают значение, полученное с помощью эталонного средства измерений, а при многократных измерениях – среднее арифметическое ряда отдельных измерений, входящих в данный ряд.

По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности [11, с.81].

*Абсолютная погрешность* – это погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины и определяемая согласно выражению (4). Абсолютная погрешность сама по себе не может служить показателем точности измерений, поэтому вводится понятие относительной погрешности.

*Относительная погрешность* – это погрешность, выраженная отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Она является более наглядной характеристикой оценки качества результата измерения по сравнению с абсолютной погрешностью. Относительная погрешность выражается в относительных единицах (в процентах) и определяется по выражению [11, с.86]:

$$\delta = \frac{\Delta}{Q} \cdot 100\% = \frac{X - Q}{Q} \cdot 100\% \quad (5)$$

*Приведенная погрешность* – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерений отнесена к условно принятому значению  $Q_N$ , постоянному на всем диапазоне измерений или его части:

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

$$\gamma = \frac{\Delta}{Q_N} \cdot 100\% = \frac{X - Q}{Q_N} \cdot 100\% \quad (6)$$

Условно принятое значение величины  $Q_N$  называют нормирующим значением. За нормирующее значение, как правило, принимают верхний предел измерений (максимальное значение измеряемой величины), т. е.  $Q_N = Q_{\max}$ . Указание погрешности измерений в виде приведенной относительной погрешности свидетельствует о том, что абсолютная погрешность измерений  $\Delta$  постоянна на всем диапазоне измерений.

Проанализировав формулы (4) и (5), можно построить графики зависимости относительных погрешностей  $\delta$  и  $\gamma$  от показания измерительного прибора с односторонней шкалой (рис. 1). Поделив шкалу прибора на четыре равные части от нуля до  $Q_{\max}$ , получим, что относительная погрешность  $\delta$  максимальна в 1-й четверти шкалы и минимальна в 4-й четверти шкалы [23, с.30].

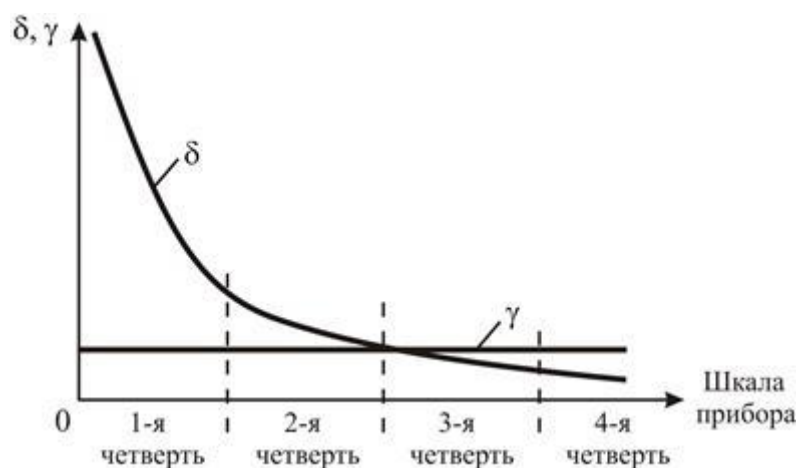


Рисунок 2.5 – Графики зависимости относительной и приведенной погрешностей от показания измерительного прибора

На основании анализа полученных графиков зависимости можно сделать следующие выводы.

1. Для получения наименьшей относительной погрешности  $\delta$  необходимо использовать 4-ю или 3-ю четверть шкалы прибора.

2. Из рисунка 2.4 зависимости  $\gamma = f(Q)$  следует, что приведенная относительная погрешность не зависит от показания прибора. Поэтому приведенная погрешность  $\gamma$  положена в основу класса точности электромеханических приборов. В соответствии с ГОСТ 8.401–80 электромеханические приборы поделены на девять классов точности.

Если в формулу (5) подставить абсолютную погрешность, выраженную через формулу (6), то получим формулу, связывающую относительную и приведенную погрешности [23, с.65]:

$$\delta = \gamma \frac{Q_N}{Q} \quad (7)$$

Относительная погрешность косвенных измерений определяется по формуле [18, с.22]:

$$\delta = |k_1 \delta_1| + |k_2 \delta_2| + \dots + |k_n \delta_n|, \quad (8)$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_n$  – показатели степени степенного многочлена;  
 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  – относительные погрешности прямых измерений.

Относительная и приведенная погрешности могут быть как положительными, так и отрицательными. На практике формула (8) чаще всего ограничивается двумя слагаемыми.

По характеру проявления различают систематическую и случайную погрешности, а также грубые погрешности (промахи).

*Систематическая погрешность* – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной для данного ряда измерений или же

									Лист
									25
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

закономерно изменяющаяся при повторных измерениях физической величины постоянного размера.

*Случайная погрешность* – составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений физической величины постоянного размера, проведенных с одинаковой тщательностью в одинаковых условиях. В появлении таких погрешностей нет какой-либо закономерности, они проявляются при повторных наблюдениях в виде некоторого разброса полученных результатов [21, с.21].

*Грубые погрешности (промахи)* – это такие погрешности, которые при исправных средствах измерений и корректных действиях экспериментатора (оператора) не должны появляться. Проявляются они в том, что результаты отдельных измерений резко отличаются от остальных.

Особое место среди погрешностей занимают *прогрессирующие (дрейфовые) погрешности*. Их особенностью является то, что они могут быть скорректированы и учтены только в данный момент времени, а в дальнейшем вновь непредсказуемо изменяются. Прогрессирующая погрешность является понятием, которое не может быть сведено к понятиям случайной и систематической погрешностей, однако в нормативных документах ее определяют как один из видов систематической погрешности.

В зависимости от источника возникновения различают методическую, инструментальную и субъективную погрешности.

*Субъективные погрешности* связаны с индивидуальными особенностями оператора. Разновидностями субъективных погрешностей являются погрешности отсчитывания, интерполяции и параллакса. *Погрешность отсчитывания* возникает из-за ошибок в отсчете показаний (примерно 0,1 деления шкалы). *Погрешность интерполяции* – это погрешность, вызванная неточностью нахождения промежуточного значения какой-либо изменяющейся величины по ряду соседних известных значений. *Погрешностью параллакса* называется погрешность, обусловленная изменением видимого

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



положения стрелки прибора относительно удаленного фона в зависимости от положения оператора. В основном же систематические погрешности возникают из-за методической и инструментальной составляющих.

*Методическая составляющая погрешности* обусловлена метода измерения, приемами использования средства измерений, некорректностью расчетных формул и округления результатов измерений [21, с.32].

*Инструментальная составляющая погрешности* возникает из-за собственной погрешности средства измерений, определяемой классом точности, влиянием средства измерений на результат измерения и ограниченной разрешающей способности средства измерений.

По условиям возникновения у средств измерений различают основную и дополнительные погрешности. Каждое средство измерений предназначено для работы в определенных условиях, указываемых в нормативно-технической документации. При этом отдельно указывают *нормальные условия* применения средств измерений, т. е. условия, при которых величины, влияющие на погрешности данного средства измерений, находятся в пределах нормальной области значений, и *рабочие условия* применения – условия работы, при которых значения влияющих величин выходят за пределы нормальных, но находятся в пределах рабочих областей. Погрешность средства измерений, определенная при нормальных условиях, называется *основной*. Погрешность, обусловленная выходом значений влияющих величин за пределы нормальных значений, называется *дополнительной*. Для оценивания дополнительных погрешностей в документации на средство измерений обычно указывают нормы изменения показаний при выходе условий измерения за пределы нормальных.

По характеру поведения измеряемой величины в процессе измерения выделяют статические и динамические погрешности [21, с.30].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

*Статическая погрешность* проявляется при работе средства измерений в статическом режиме, когда показания средства измерений не зависят от его динамических свойств, или когда этой зависимостью можно пренебречь.

*Динамическая погрешность* возникает при работе средства измерений в динамическом режиме и определяется двумя факторами: динамическими (инерционными) свойствами средства измерений и характером изменения измеряемой величины.

У средств измерений часто можно выделить составляющие погрешности, не зависящие от значения измеряемой величины, и погрешности, изменяющиеся пропорционально измеряемой величине. Такие составляющие называются, соответственно, *аддитивными* и *мультипликативными погрешностями*.

## 2.6 Стенд учебный СИУ-01

### 2.6.1. Первичная настройка и опробование автоматизированного стенда

Прежде, чем приступить к проведению экспериментов на стенде, необходимо провести настройку приборов и опробование.

**Настройка и опробование включают в себя следующее [27, с.2]:**

1. Ознакомление с техникой безопасности перед работой со стендом.
2. Внешний осмотр соединений.
3. Внешний осмотр приборов.
4. Включение автоматизированного стенда.
5. Пробная подача газа.

#### **Внешний осмотр соединений**

Перед работой со стендом необходимо провести визуальный осмотр механических, электрических и пневматических соединений стенда [27, с.11].

При осмотре механических соединений следует обратить внимание на состояние болтов и гаек, используемых для крепежа приборов. Проверить

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		28

надежность крепления коллекторов воздушного и водного трактов. Проверить надежность соединения лицевой части стенда к стойкам, проверить крепления стола и устойчивость стенда. Особое внимание уделить состоянию крепежей водяного бака и ресивера.

При осмотре электрических соединений обратит внимание на состояние заземления и изоляции стенда. Убедиться, что питающие провода не имеют повреждений, потертостей, сдавленных мест.

Осмотр пневматических соединений стенда включает в себя проверку герметичности шлангов, трубок, коллекторов. Убедиться, что соединения не имеют зазоров, отсутствуют механические повреждения частей, проводящих газ или жидкость, особенно состояния герметичности бака и ресивера. Проверить состояние кранов и клапанов путем поочередного открывания и закрывания. Не допускать попадания воды в воздушный тракт.

### **Внешний осмотр приборов**

При внешнем осмотре приборов необходимо проверить [27, с.13]:

- состояние лакокрасочного покрытия;
- четкость изображения надписей на маркировочной табличке, а также цифр на циферблате и роликов отсчетного устройства;
- проверить наличие стрелки для стрелочных приборов;
- проверить наличие пятен, сколов, трещин, потенциально препятствующих считыванию показаний;
- проверить наличие поплавка в ротаметре, проверить целостность колбы;
- проверить целостность сужающих устройств;
- для цифровых приборов проверить состояние кнопок и дисплея;
- проверить состояние тумблеров и переключателей на блоке питания и блоке управления.

Обо всех замеченных неисправностях, препятствующих работе стенда, немедленно сообщить преподавателю.

### **Включение автоматизированного стенда**

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Включение автоматизированного стенда осуществляется только после ознакомления с общими требованиями безопасности, внешнем осмотре соединений и приборов и только при разрешении преподавателя.

Включения стенда производится переключением тумблера на блок питания в положение «ВКЛ» и подачей питания на стенд тумблеров «Подать питание» на блоке управления. Если при включении стенда ощущается запах плавящейся проводки, слышен треск или видны искры, следует немедленно отключить стенд кнопкой «Аварийное отключение», расположенной на блок управления, сообщить о случившемся преподавателю.

### **Пробная подача газа**

Прежде, чем приступить к выполнению экспериментов, необходимо произвести пробную подачу газа в тракт. Для этого требуется:

- включить компрессор;
- переключить тумблер «подача воздуха в ресивер» в положение «вкл»;
- накачать 3-4 атмосферы в ресивер, следя за уровнем по приборам;
- выключить подачу воздуха;
- убедиться в герметичности соединений, проверить, нет ли утечек;
- пустить газ поочередно через сужающие устройства, при этом проверить, реагируют ли измерительные приборы;
- в случае исправности соединений и приборов опустошить ресивер ручкой регулировки давления;

Только по завершении описанных операций стенд можно считать пригодным к эксплуатации. Если хотя бы один из пунктов не соответствует требованиям безопасности, работы на стенде проводить запрещается.

### 2.6.2 Подготовка стенда к работе

Прежде, чем приступить к проведению эксперимента на учебном стенде, необходимо грамотно скомпоновать приборы, исходя из задач предстоящего опыта [27, с.15].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



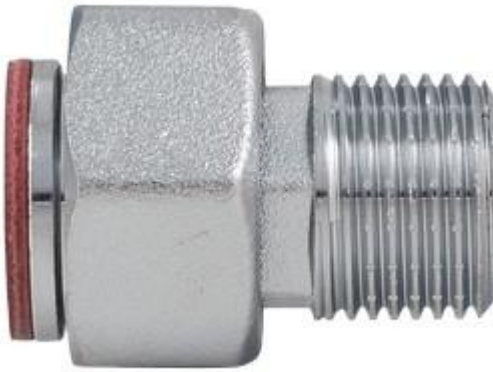


Рисунок 2.8 – Штуцер с накидной гайкой

Для измерения расхода газа на пути установлены два ограничительных устройства с отверстиями диаметром 1 мм и 2 мм соответственно.



Рисунок 2.9 – Сужающие устройства

В случае метода постоянного падения давления используется ротаметр ПМ-4-2,5, который также подключается с помощью пневматических трубок [13, с.28].



Рисунок 2.10 – Ротаметр РМ-4-2,5



Рисунок 2.11 – Расходомер FESTO

Цифровой расходомер подключен последовательно к выходу ротаметра и к входу счетчика СГБМ-1.6 [13, с.32].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		33



Рисунок 2.12 – Счетчик СГБМ-1,6

Здесь образцовым средством измерения является цифровой датчик с классом точности 0,5 [13, с.33].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		34



## 3 ОБЗОР ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ СИСТЕМАМ

### 3.1 CAD/CAM/CAE-системы

Среди наиболее эффективных технологий для выполнения таких требований как сокращение срока выпуска продукции на рынок, снижение себестоимости и повышение качества продукции, принадлежат системы которые называются CAD/CAM/CAE.

Системы САПР необходимы для решения широкого круга задач проектирования и разработки проектной документации (программное обеспечение САПР). Вероятно, универсальные **CAD-системы** имеют задачу моделирования трехмерного построения детали и составления чертежей и печатной конструкторской документации (спецификации, ведомости).

**CAM-системы** предназначены для обработки изделий на станках с ЧПУ и объемом задач для этих станков (фрезерование, сверление, эрозия, штамповка, токарная обработка, шлифование и т. Д.). CAM-системы также называют системами подготовки процесса.

**Системы CAE** объявляются как большой класс систем, каждая из которых позволяет решать конкретную теорию расчета (группу задач), начиная от расчета прочности, анализа и моделирования тепловых процессов до очень сложных задач, таких как расчет гидравлических систем и машин, расчет процессы литья. Системы CAE также используют 3D-продукт, созданный в системе CAD. Системы CAE также называют системами инженерного анализа.

### 3.2 История развития мирового рынка CAD/CAM/CAE-систем

Историю рынка CAD / CAM / CAE-систем можно разделить на три основных этапа, каждый из которых длился около 10 лет.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Начиная с 70-х. Именно тогда были получены знания, которые помогли доказать возможность создать сложные детали. Второй этап начался уже в 80-е. Тогда и создались, и начали массово распространяться CAD/CAM/CAE-системы. Самый последний этап, который продолжается до сих пор это начиная с 90-х. В этот этап происходит усовершенствование функций CAD/CAM/CAE-систем дальше они достаточно резко и быстро распространяются в более высокие производства, там они более выгоднее и эффективнее проявляют себя.

Тогда в 80-е рынок системы Cad разделился на отдельные части. Электрические и механические сегменты систем CAD делятся на ECAD и MCAD. Производители рабочих станций для компьютерных CAD-систем были разделены на два разных направления:

- Некоторые производители перешли на архитектуру ПК на базе микропроцессора IBM x86;
- Оставшиеся производители хотели переключиться на архитектуру Motorola (на ее производственных ПК работали Unix от AT & T, Macintosh от Apple и Domain OS от Apollo).

Уже с середины 90-х гг. компания Intel сделали дешевле чем раньше свои транзисторы, которые выпускали, благодаря развитию маленьких технологий, и с помощью этого компания увеличила производительность свои же транзисторов. Затем эти станции начали быстро опережать друг друга, станции, кстати, основывались на ПК со станциями RISC / Unix. В результате появилась возможность для успешной конкуренции программ, которые работают на базе ПК RISC / Unix. По сей день эти станции успешно работают и отвечают всем возможным требованиям, которые к ним относятся. На сегодняшний день они хорошо себя ведут и показывают. Они быстро реагируют на все изменения вокруг них.

									Лист
									36
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					



можно назвать системами верхнего более продвинутого уровня. Таким образом системы, которые стоят ниже становятся на ступеньку выше.

### 3.4 Пакет ANSYS

Рассмотрим один из интересных пакетов FEA-программ пакет ANSYS.

У этого пакета достаточно большое количество пользователей, на официальном сайте можно об этом убедиться, там сказано что их более миллиона и они легальны. Стоит ответить когда речь идет о высоком качестве и требуемых требованиях, то кажется что цена будет завышена, но нет. У пакета достаточно приемлемая цена. И качество на высшем уровне.

Именно эта программа строится на прексаном методе конечно элементного анализа, что говорит об её уникальности и универсальности. Быстро развивается у специалистов этого профиля примерно на протяжении 31 года. Пакет очень популярен у специалистов, которые направлены на инженерные расчеты, которые проходят автоматически. Пакет ANSYS является универсальным он помогает решать задачи линейного и нелинейного формата, задач пространства механики стационарных и нестационарных, когда происходит изменение довольно твердого тела, можно сказать происходит деформация, так же решает задачи специализированные на механики изделия, которые в свою очередь берут в себя задачи геометрии, взаимодействия друг с другом элементов объекта, так включает задачи простые такие как задачи механики жесткости газа, и самое главное задачи механики связанные полями. Всё выше сказанное подтверждает универсальность пакета и большие возможности.

Реальным преимуществом этой системы является наиболее полная система документации и помощи, которая позволяет, обладая хорошими базовыми знаниями, использовать программу без обращения в службу поддержки. Обилие конечных элементов (более 100) впечатляет, но сомнительно в их необходимости. Например, автору статьи легко и быстро удалось доказать активным членам

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



### 3.5 Модернизация Ansys

#### Совершенствование технологий:

- перекрывающиеся сетки для расчетов с подвижной геометрией позволяют обойтись без перестройки сетки;
- включена поддержка сжимаемых токов в Adjoint Solver, улучшенный инструмент Design Tool;
- модель излучения Монте-Карло стала доступной для ANSYS Fluent;
- для расчета блейд-машин применяется подход Гармонического анализа, дополняющий семейство подходов Transient Blade Row (TBR);
- новая модель турбулентности Стресс-БСЛ;
- динамический двусторонний FSI на основе CFX теперь реализован с использованием системной связи;
- возможность использовать профили, чтобы установить перевод и вращательное движение границ;
- описание движения динамических объектов теперь возможно относительно друг друга;
- для удобства пересчета углов поворота динамических объектов в Fluent стал доступен калькулятор ориентации.

#### Усовершенствование интерфейса:

- интерфейс ANSYS FLUENT, верхнее меню заменено на ленту с вкладками;
- при расчете в ANSYS CFX доступно отображение результатов в процессе решения;
- в окне проекта ANSYS Workbench стало возможным отслеживать содержимое консоли Fluent во время вычислений, а также просматривать предварительно определенные распределения параметров по завершении вычислений, не запуская сам сеанс Fluent.
- 

									Лист
									40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР				

### 3.6 Конечно-элементный анализ

Метод конечных элементов с использованием численных алгоритмов является универсальным процессом при решении задач механики твердого тела. Когда-то популярный метод конечных разностей, а также метод граничных элементов (граничные интегральные уравнения), который претендовал на универсальность, теперь занимают довольно узкие ниши, ограниченные исследованиями или специальными целями. FEM заняла лидирующее положение благодаря способности моделировать широкий спектр объектов и явлений.

Абсолютное большинство конструктивных элементов, узлов и конструкций, изготовленных из самых разных материалов различной природы, можно рассчитать с помощью анализа методом конечных элементов. В этом случае, конечно, необходимо принимать во внимание неизбежные условности и неточности в любом численном приближении. Поэтому вопрос соответствия расчетных и экспериментальных моделей, возможно, актуален при использовании программ анализа.

Несмотря на то, что такие программы имеют более или менее подробную документацию, они все равно остаются в определенной степени черными ящиками. Это означает некоторую непредсказуемость результатов, а также некоторый произвол в их интерпретации. Следовательно, качество выводов, сделанных на основе результатов, полностью зависит от квалификации, а также, в отношении анализа прочности, фундаментального знакомства с основами FEM.

#### 3.6.1 Основная идея метода конечных элементов

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любая непрерывная величина, такая как температура, давление и смещение, может быть аппроксимирована дискретной моделью, которая основана на другом наборе кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном количестве поддоменов. Кусочно-непрерывные функции определяются с использованием

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

значений непрерывного значения в конечном числе точек рассматриваемой области.

В общем случае непрерывная величина заранее не известна, и необходимо определить значения этой величины в некоторых внутренних точках региона. Однако дискретную модель очень легко построить, если сначала предположить, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны. Тогда вы можете перейти к общему делу. Итак, при построении дискретной модели непрерывного значения действуйте следующим образом:

1. В рассматриваемой области ограничено конечное число узлов. Эти узлы называются узловыми точками.

2. Значение непрерывного значения в каждом узле считается переменной, которая должна быть определена заранее.

3. Область определения непрерывной величины делится на число вершин поддоменов, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности приближают форму региона.

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с использованием узловых значений этой величины. Для каждого элемента определен многочлен, но многочлены выбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента.

5. Рассматривается непрерывное значение  $T(x)$ , область определения представляет собой отрезок вдоль оси. Пять точек на оси  $x$  фиксированы и пронумерованы. Это узловые точки, и совсем не обязательно размещать их на одинаковом расстоянии друг от друга. Очевидно, что можно ввести в рассмотрение более пяти пунктов, но этих пяти вполне достаточно, чтобы проиллюстрировать основную идею метода. Значения  $T(x)$  в этом случае известны в каждой узловой точке.

									Лист
									42
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					



### 3.7 Интерфейс SolidWorks Flow Simulation

Интерфейс SolidWorks Flow Simulation полностью русифицирован. Flow Simulation Help не ограничивается информацией о самой программе, но также охватывает вопросы прикладной гидродинамики, инженеры получают своего рода справочник, написанный существующими экспертами. Общие улучшения SolidWorks Flow Simulation ускоряет генерацию исходной сетки с использованием нескольких процессорных ядер или процессоров. Solver позволяет одновременно решать до двух задач с использованием всех ядер / процессоров

Общая модернизация:

- расширение номенклатуры API - расширена номенклатура процедур, доступ к которой можно получить через API;
- поддержка многоядерных / многопроцессорных систем. В новой версии есть задача распараллеливания. Эффективность использования многопроцессорной обработки зависит от масштабности задачи: чем больше конкретное значение вычислений, тем выше оно.

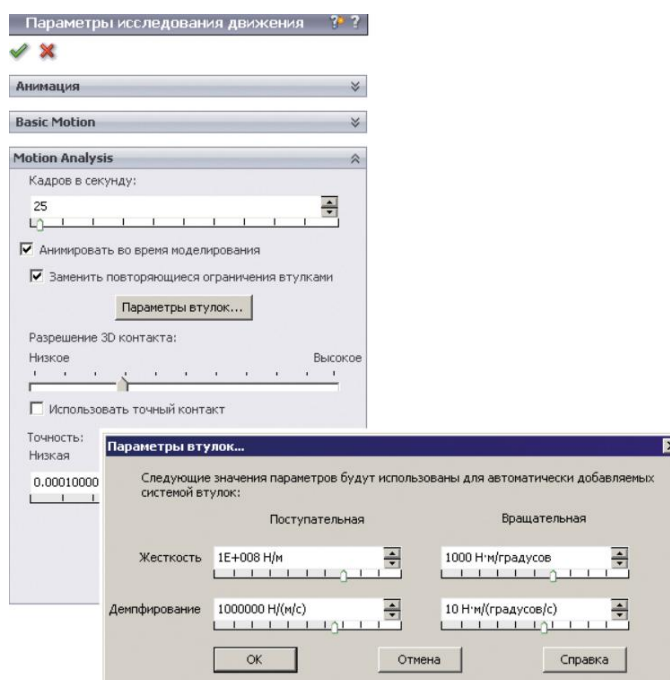


Рисунок 3.1 – Параметры податливых втулок для замены избыточных ограничений

## Физические модели

- Расширенный ассортимент неньютоновских жидкостей:
  - Модель Cross-William-Landel-Ferry (Cross-WLF), более адекватно описывает зависимость вязкости от температуры и давления.
  - Полиномиальная аппроксимация зависимости вязкости от скорости сдвига.
- Отдельное задание параметров солнечного излучения и радиационного теплообмена. Свойства объектов - тел и поверхностей - в отношении солнечного излучения и фактического теплообмена излучением задаются независимо друг от друга. В принципе, этот подход является паллиативным в отношении учета зависимости характеристик от длины волны излучения, но для технического анализа он является наиболее адекватным.

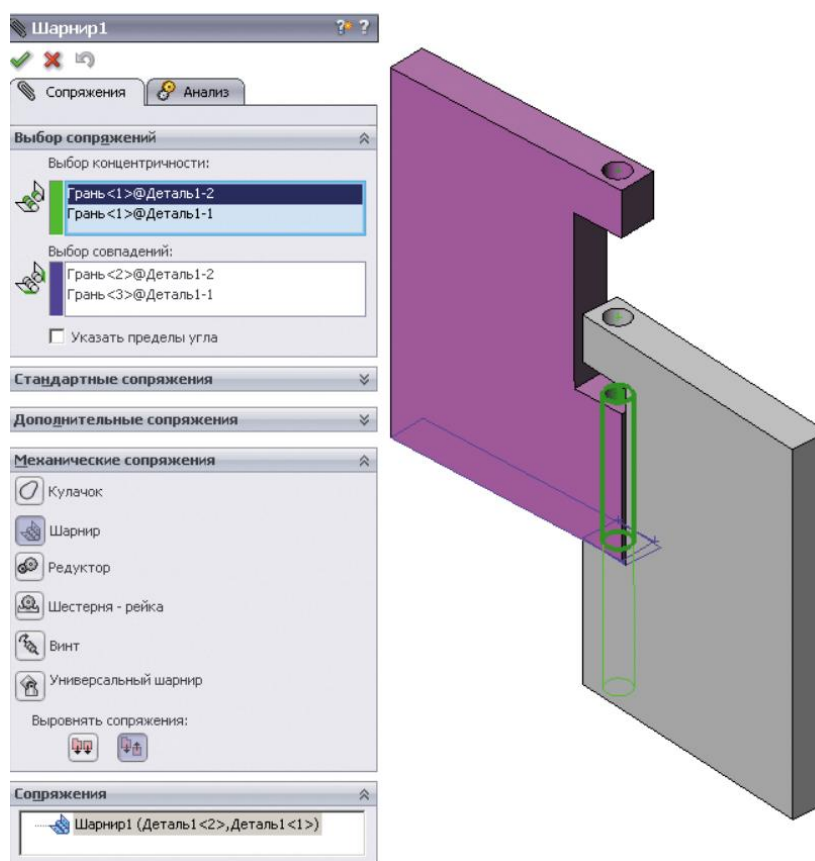


Рисунок 3.2 – Сопряжение «шарнир»

## Препроцессор

- Ярлыки для граничных условий на модели;
- Интерфейс для рационализации в стиле менеджера свойств SolidWorks.

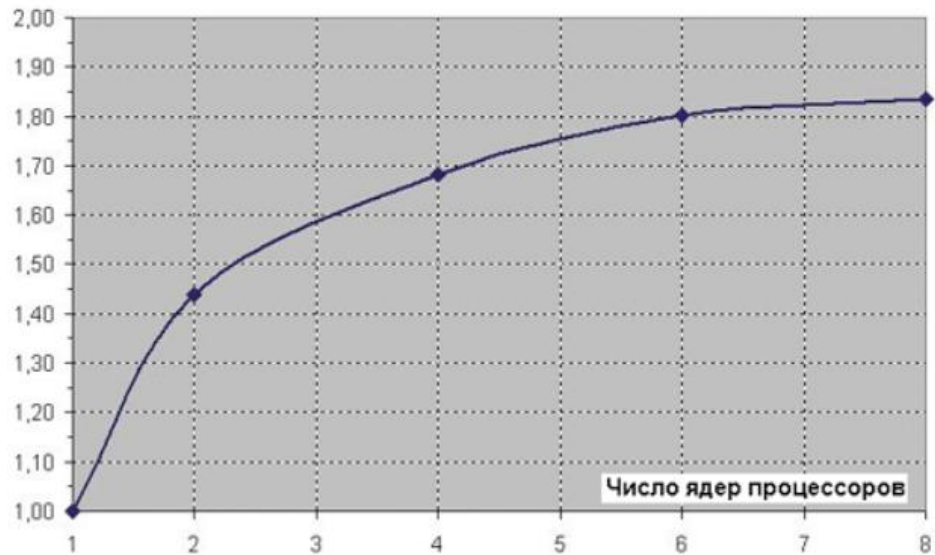


Рисунок 3.3 – Коэффициент использования ресурсов процессоров в Flow Simulation

## Постпроцессор

- Функция зонда на разрезах и схемах.
- Расчет параметров:
  - Возраст воздуха - время действия воздуха - время прохождения воздухом расстояния от одной точки внутреннего объема до другой;
  - средний возраст воздуха - среднее время полета;
  - Локальный средний возраст воздуха - локальное значение времени действия воздуха - среднее время прохождения воздухом расстояния от входа до точки.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

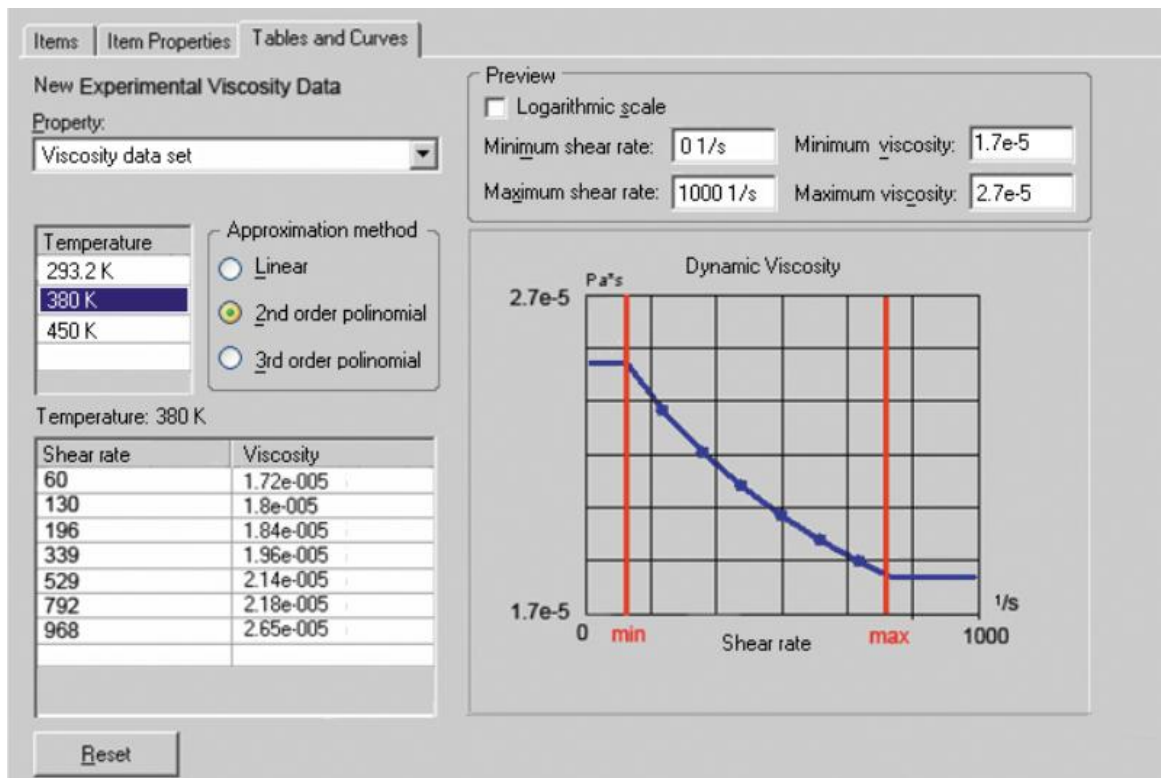


Рисунок 3.4 – Полиномиальная аппроксимация вязкости

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

### 4.1 Создание геометрической модели

На этапе создание модели была смоделирована твердотельная форма трубки ротаметра с поплавком.

В среде SolidWorks построение сложной модели осуществляется в 2 этапа [3, с.56]. На первом этапе были созданы отдельные элементы проточной части, такие как поплавок, трубка ротаметра. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.1.

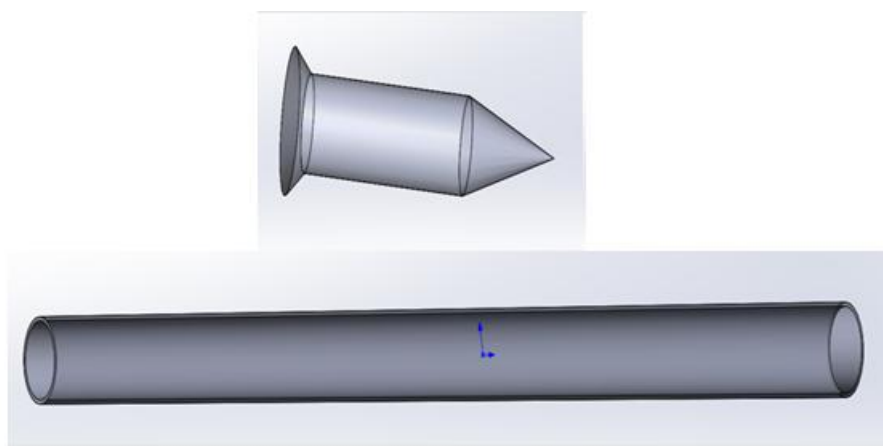


Рисунок 4.1 – Элементы проточной части

Был запущен учебный стенд и выбран перепад давлений между входом и выходом ротаметра, так же было определено равновесное положение поплавка, которое равно 82 мм (рисунок 4.2). Были произведены замеры. Эти же размеры были взяты за основу конечно-элементной модели.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



Рисунок 4.2 – Равновесное положение поплавка

На втором этапе отдельные модели были объединены в сборку (между ними были выставлены условия сопряжения, каждый из объектов жестко закреплен с остальными).

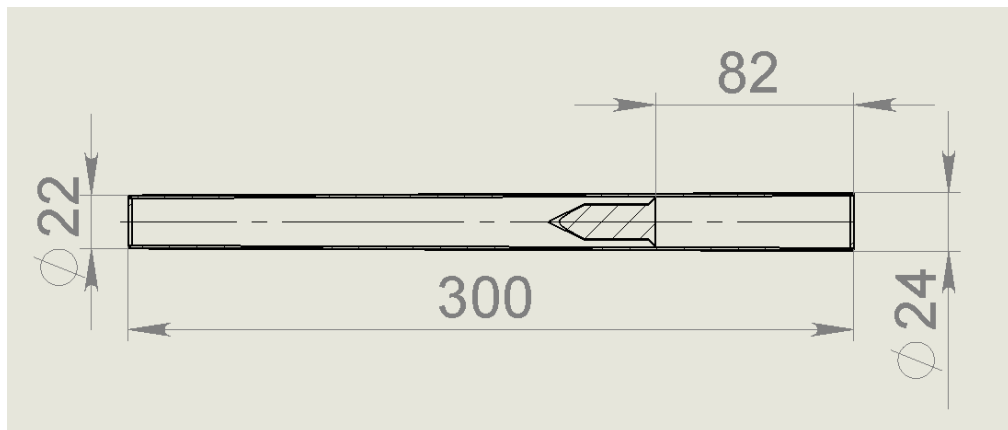


Рисунок 4.3 – Готовая модель проточной части ротаметра с размерами

## 4.2 Создание конечно-элементной модели

На основе созданной выше геометрической модели ротаметра, в которой все еще остаются не уточненные размеры поплавка ротаметра создается предварительная конечно-элементная модель проточной части расходомера.

### 4.2.1 Препроцессинг

Препроцессинг – это этап подготовки, задание начальных и граничных условий, а также задание необходимых констант для исследования, анализа модели [4, с.11].

В программе SolidWorks препроцессинг осуществляется в несколько этапов:

1) Выбор единиц измерения. В качестве системы единиц измерения выбрана система СИ.

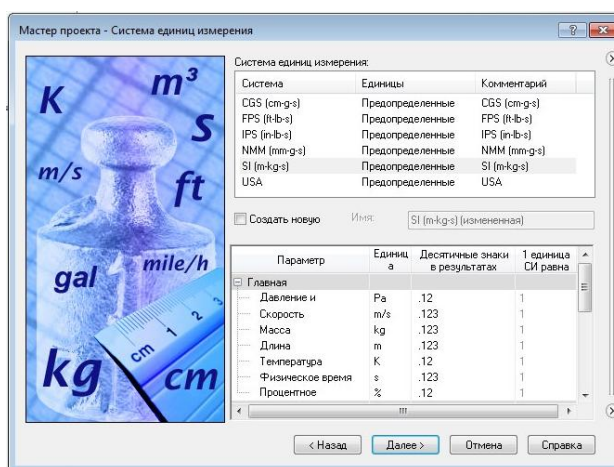


Рисунок 4.4 – Выбор системы единиц измерения

2) Выбор типа задачи. Так как в нашем случае происходит исследования проточной части, то выбираем тип задачи «Внутренняя».



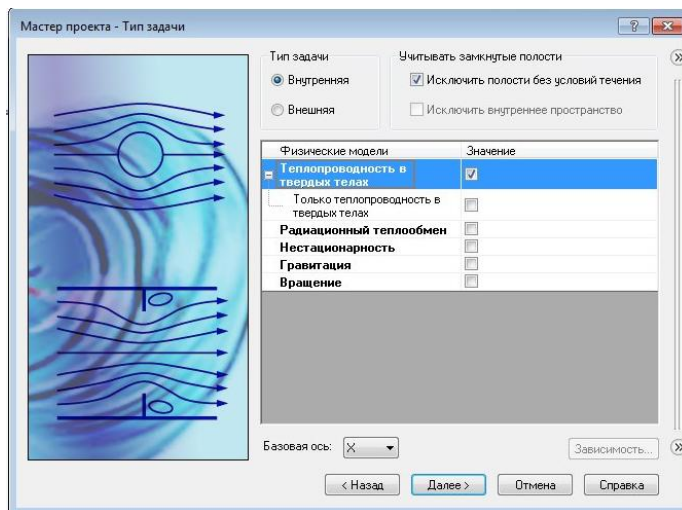


Рисунок 4.5 – Выбор типа задачи

3) Выбор текучей среды. Исследуемый расходомер предназначен для работы с газообразной и жидкой средой, поэтому в качестве текучей среды выбираем газ.

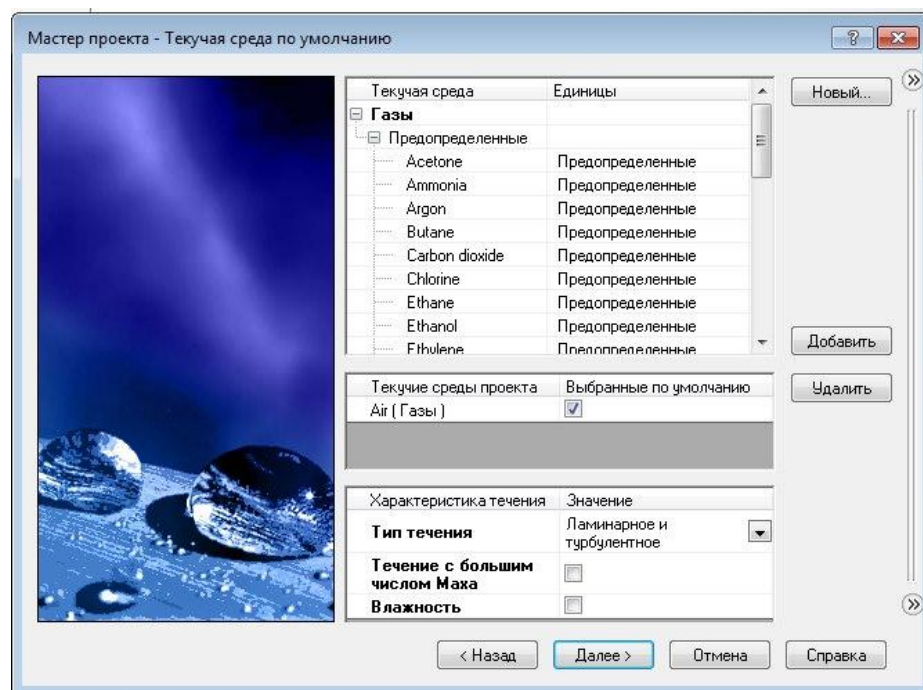


Рисунок 4.5 – Выбор текучей среды

4) Начальные условия. В качестве начальных условий выбираем давление  $10^5$  Па и температура  $20^{\circ}\text{C}$ .



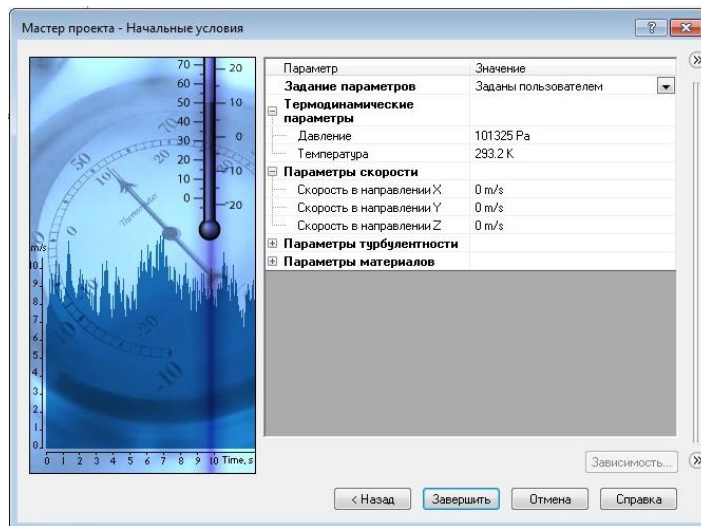


Рисунок 4.6 – Задание начальных условий

5) **Граничные условия.** Это данные и параметры, которые нам известны заранее на границах (на входе и выходе ротаметра) нашей задачи.

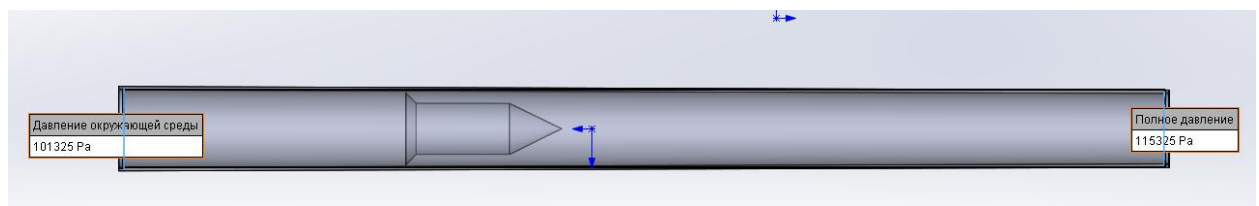


Рисунок 4.7 – Задание граничных условий

5) **Цели.** На данном этапе выбираем величину, которая должна быть рассчитана средой Flow Simulation. В нашем случае это «Полное давление» и «Объемный расход» на входе, «Сила давления» на тело обтекания.



Варьировать размер сетки можно передвижением ползунка, цифра под ним показывает, насколько мелкая сетка будет использована, чем больше сетка, тем меньше размер ячейки.

В ручном режиме настройки размера ячеек можно задавать минимальную толщину конечных элементов, задавать минимальный зазор. Данные параметры можно связать с размером ячейки в зависимости от его значения.

#### 4.2.2 Процессинг

Процессинг – это деятельность по обработке информации, используемой при совершении вычислительных операций [4, с.15].

Контроль сходимости процесса выполнен по трем параметрам: объемный расход, полное давление и сила давления.

Можно наглядно увидеть результаты, получить их в виде таблицы, графиков.

Результаты вычисления приведены на рисунке 4.10.

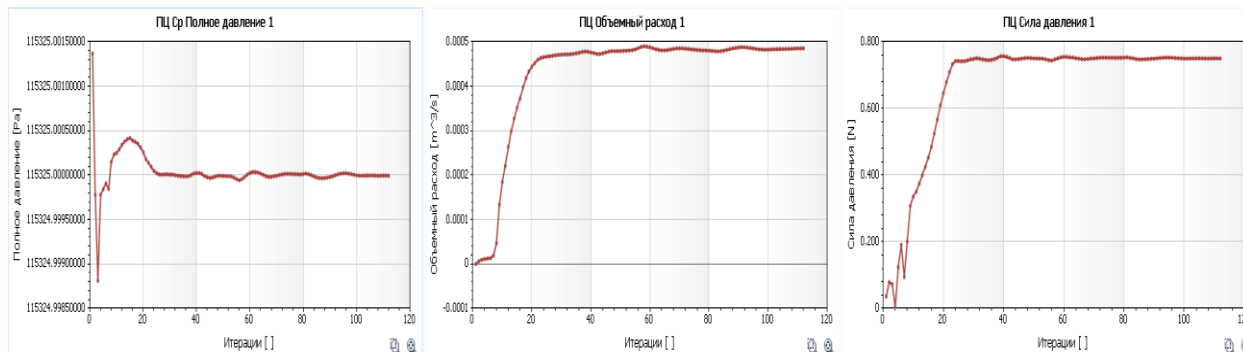


Рисунок 4.10 – Вывод результатов в виде графиков

В процессе решения поставленной задачи система алгебраических уравнений, полученная в результате дискретизации модельных уравнений на основе метода конечных элементов, решается с использованием итерационного процесса на основе метода Ньютона.

В результате расчета со стандартными параметрами Flow Simulation (точность аппроксимации на уровне 5, итерационная точность в относительных единицах

0,001), полученный результат объемного расхода в имитационном процессе  $Q=0,00048 \text{ м}^3/\text{с}$ , при температуре  $20^\circ\text{C}$  что соответствует  $Q=0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$  полученному экспериментально с некоторой погрешностью.

Анализируя результаты, видим, что процесс сошелся по всем трем параметрам за 112 итераций. Это говорит об итерационной сходимости задачи.

**Объемный расход** – это объем жидкости или газа, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени.

**Полное давление** – это давление, которое равно сумме атмосферного и избыточного.

**Сила давления** – это основной расчетный параметр, именно он определяет подъемную силу на поплавков со стороны набегающего потока.

#### 4.2.3 Постпроцессинг

Постпроцессинг – это всё то, что происходит после основных действий и вывести результат можно в удобном для пользователя представлении [4, с.26].

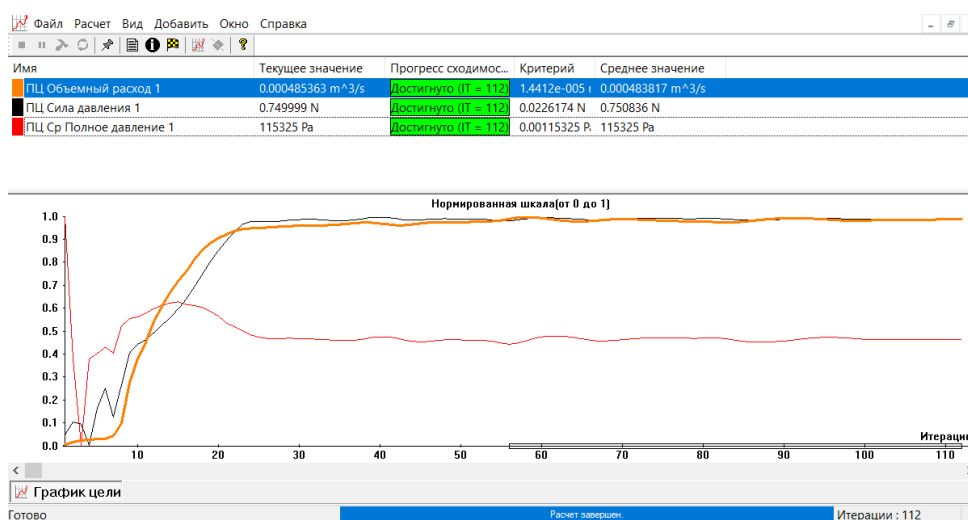


Рисунок 4.11 – Процесс сходимости

Также, с помощью полученных результатов можно наглядно отследить физические особенности процесса, такие как перепад давления воздуха в трубке и скорость воздуха.

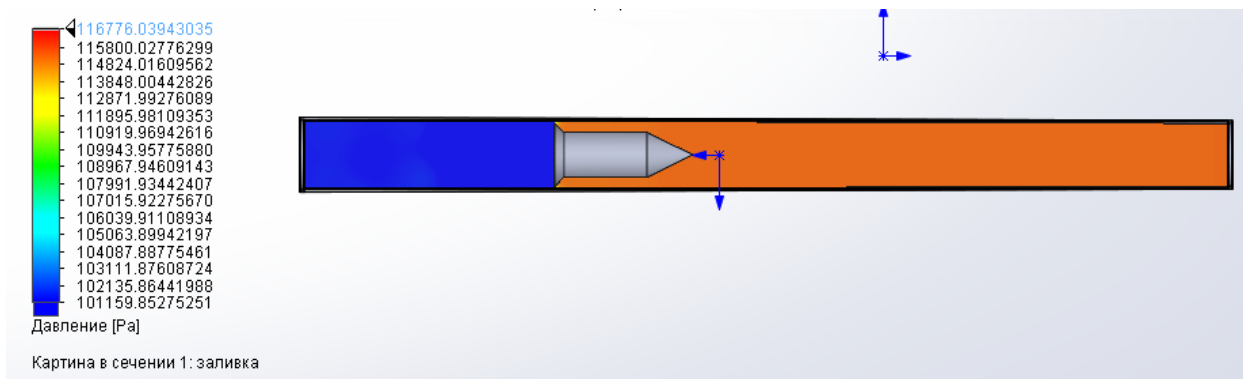


Рисунок 4.12 – Поля давлений в трубке

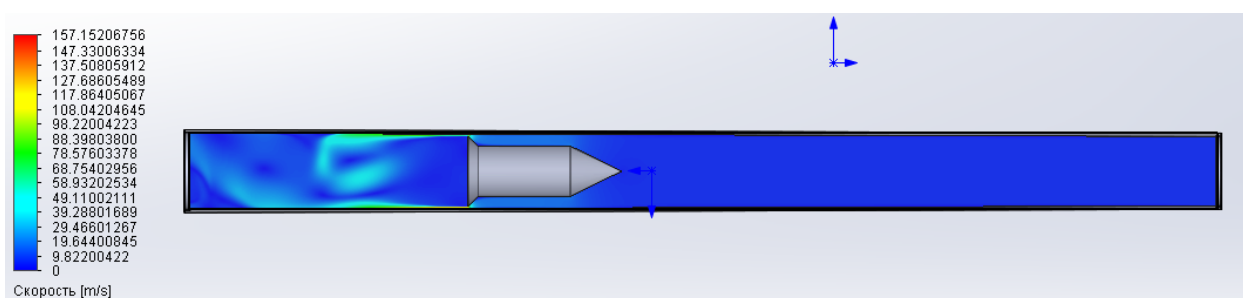


Рисунок 4.13 – Поля скоростей в трубке

#### 4.3 Идентификация параметров поплавка ротаметра

Для определения некоторых параметров ротаметра, которые отсутствуют в паспорте на прибор (вес поплавка и его геометрические размеры, статическая характеристика) и которые необходимо получить для создания реальной геометрической и конечно-элементной модели объекта, необходимо поставить и решить задачу идентификации, используя расчетно-натуральный (натурный) подход.

Определим наибольшее **поперечное** (миделево) **сечение поплавка**.

1. Для этого создадим геометрическую и, затем, конечно-элементную модель проточной части ротаметра, используя оценочные (приближенные) размеры, полученные путем визуализации через стеклянный корпус ротаметра с помощью мерительных инструментов – линейка и штангель-циркуль.

2. На стенде, экспериментально, определим одно из возможных положения поплавка и зафиксируем на фотографии показания измерительных приборов.



Рисунок 4.14 – Показания приборов при определении параметров поплавка

Показания составляют: высота подъема поплавка  $\delta = (82 \cdot 10^{-3} \text{ м})$ , давление на входе  $P_{\text{вх}} = (115325 \text{ Па})$ , расход  $Q = (0,000484384 \text{ м}^3/\text{с})$

3. Повторяем в геометрической  $3d$  модели конфигурацию проточной части ротаметра с учетом высота подъема поплавка  $\delta$  и итерационно добиваемся равенства расчетного расхода экспериментальному путем изменения модельного

радиуса мидельного сечения поплавка. В результате найден радиус поплавка  $R_{\Pi}$  и площадь мидельного сечения поплавка  $S_{\Pi}$ :

$$R_{\Pi} = 0,00728 \text{ м}, S_{\Pi} = 5,357 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (9)$$

#### 4.3.1 Вес поплавка

1. Определим в первом приближении **вес поплавка  $G$** . В установившемся положении у ротаметра наблюдается статическое равновесие поплавка в набегающем потоке воздуха, т.е [28, с.144]:

$$P \cdot S_{\text{эф}} - G = 0, \quad (10)$$

и, следовательно,  $G = P \cdot S_{\text{эф}}$ . Можно показать, что эффективная площадь близка к мидельной площади поплавка ротаметра. Величина  $P$  равна разности абсолютных давлений на входе  $P$  и выходе  $P_0$  ротаметра (давление на выходе  $P_0$  равно атмосферному 101325 Па, поэтому  $P$  – это избыточное давление), тогда:

$$G \approx P \cdot S_{\text{м}} = (115325 - 101325) \cdot 5,357 \cdot 10^{-5} = 0,750 \text{ Па} \quad (11)$$

$$G \approx 0,0750 \text{ кГ} \approx 0,75 \text{ Н}$$

2. Для уточнения веса поплавка найдем полную силу давления, действующую на поплавок со стороны воздуха. Сила гидростатического давления на криволинейную поверхность равна  $P$  [10, с.56]:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (12)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

где –  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  составляющие силы избыточного давления по соответствующим осям. В движущемся воздухе к гидростатическим силам добавляются и другие силы, например силы трения и силы, связанные с характером течения воздуха, поэтому для нахождения веса поплавок необходимо найти полную силу давления  $F$ , действующую в момент равновесия поплавок. В программе Flow Simulation одним из результатов расчета является полная сила давления, которая в проекции на ось  $x$  ( $F=F_x$ ) и в условиях равновесия поплавок равна весу тела

$$G = Fx = 0,750816 \text{ Па} \approx 0,751 \text{ Па} \quad (13)$$

#### 4.3.2 Статические характеристики ротаметра

Статическая характеристика является основной рабочей и метрологической характеристикой ротаметра, которую невозможно получить в среде конечно-элементного моделирования без трудоемких многоходовых приближений по итерационному принципу [29, с.46]. Поэтому используем натурный способ, проведя эксперимент на стенде.

На фотографиях представлены результаты измерений с фиксацией показаний ротаметра, манометров и цифрового термоанемометра. Наличие фотографий позволяет синхронно сделать измерения, что недоступно в ручном режиме.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



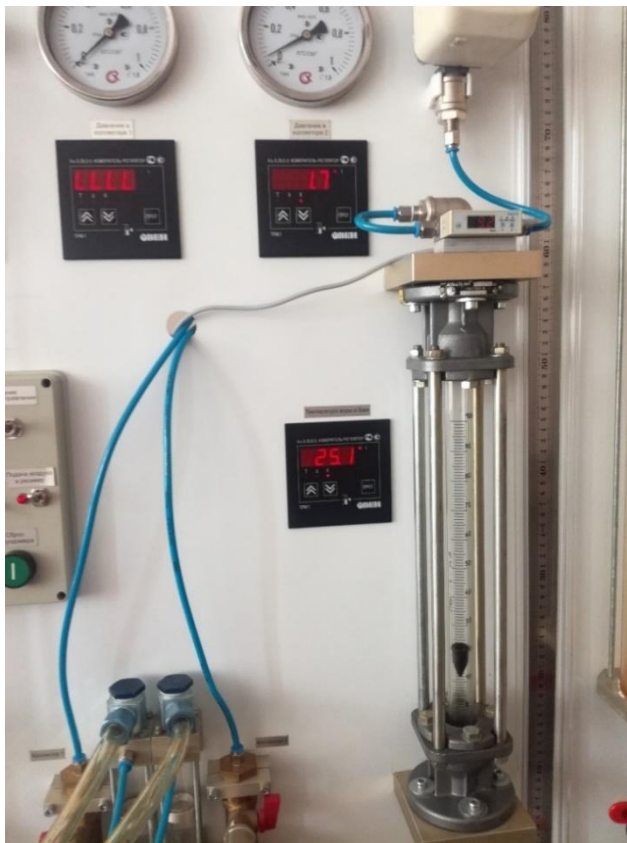


Рисунок 4.15 – Показания приборов при первом положении поплавка

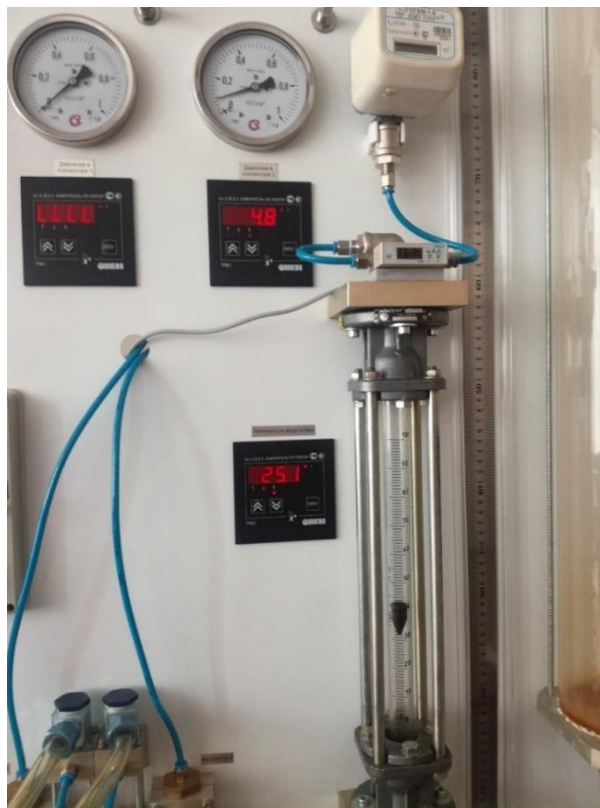


Рисунок 4.16 – Показания приборов при втором положении поплавка

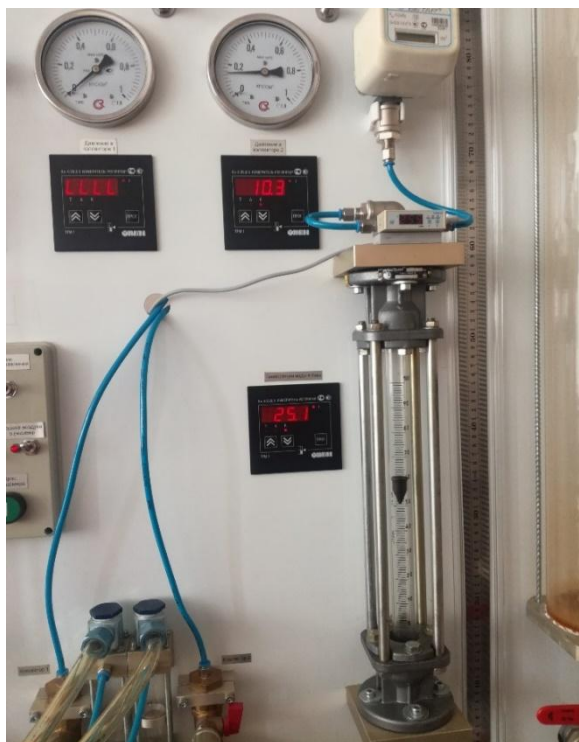


Рисунок 4.17 – Показания приборов при третьем положении поплавка



Рисунок 4.18 – Показания приборов при четвертом положении поплавка

Данные с фотографий сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Показания приборов

Q, л/мин	Q, м <sup>3</sup> /с	δ, дюйм	δ, м	P, атм	P, Па
9,2	0,000153	20	0,0508	1,7	4903,325
17,2	0,000286	40	0,1016	4,8	8825,985
25,5	0,000425	60	0,1524	10,3	14709,98
33,8	0,000563	80	0,2032	20,4	23634,026

Основной метрологической характеристикой любого измерительного прибора является функция преобразования [32, с.88]. В данном случае, входной характеристикой ротаметра является расход, а выходной – положение поплавка, поэтому, исходя из полученных экспериментальных данных, функция преобразования ротаметра или его основная статическая характеристика может быть представлена графиком на рисунке 4.19. График построен по данным из таблицы 2.

Таблица 2 – Данные, полученные в ходе эксперимента

δ, м	Q, м <sup>3</sup> /с
0,0508	0,000153
0,1016	0,000286
0,1524	0,000425
0,2032	0,000563

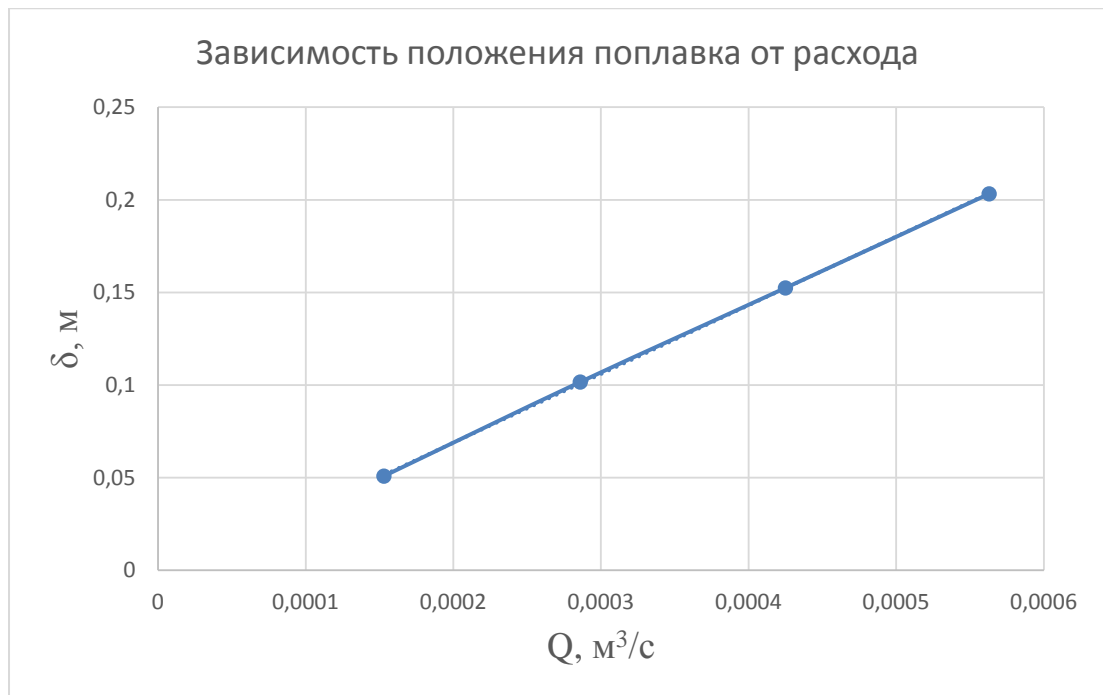


Рисунок 4.19 – Зависимость положения поплавка от расхода (функция преобразования) и ее линейная аппроксимация

Вспомогательной статической характеристикой является зависимость положения поплавка от избыточного давления на входе (при условии выхода газа в окружающее пространство). График зависимости представлен на рисунке 4.20. График построен по данным из таблицы 3.

Таблица 3 – Данные, полученные в ходе эксперимента

δ, м	P, Па
0,0508	4903,325
0,1016	8825,985
0,1524	14709,98
0,2032	23634,026

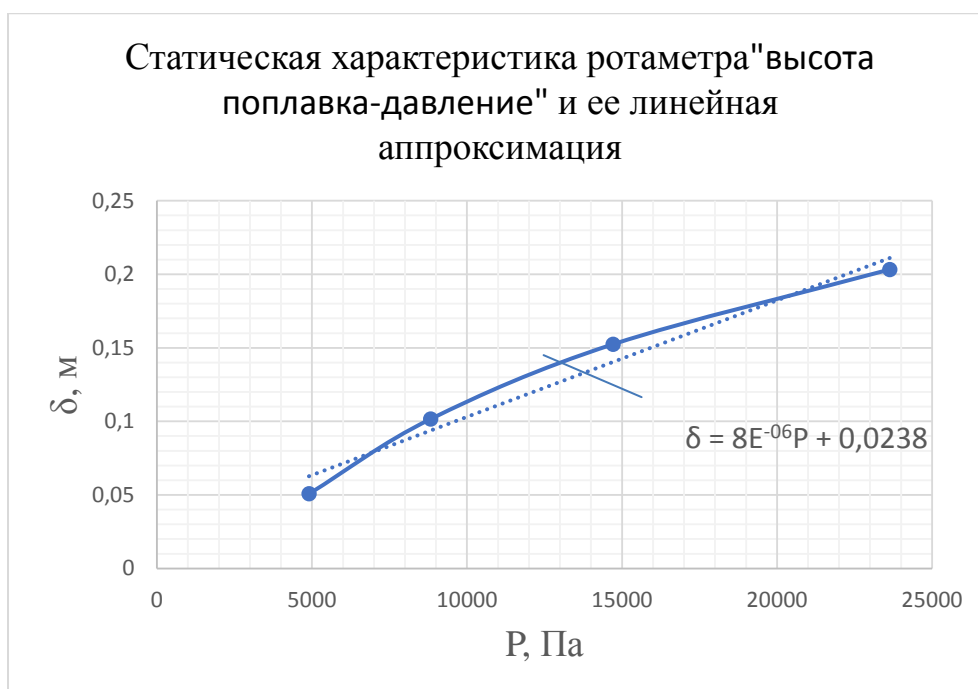


Рисунок 4.20 – Зависимость положения поплавок от избыточного давления на входе (статическая характеристика)

Погрешность нелинейности составляет 0,02м.

Если умножить величину давления на эффективную площадь, то получим зависимость высоты подъема поплавок от величины полного давления в проекции на вертикальную ось.

Таблица 4 – Данные, полученные в ходе эксперимента

δ, м	F, Н
0,0508	0,26
0,1016	0,47
0,1524	0,79
0,2032	1,27

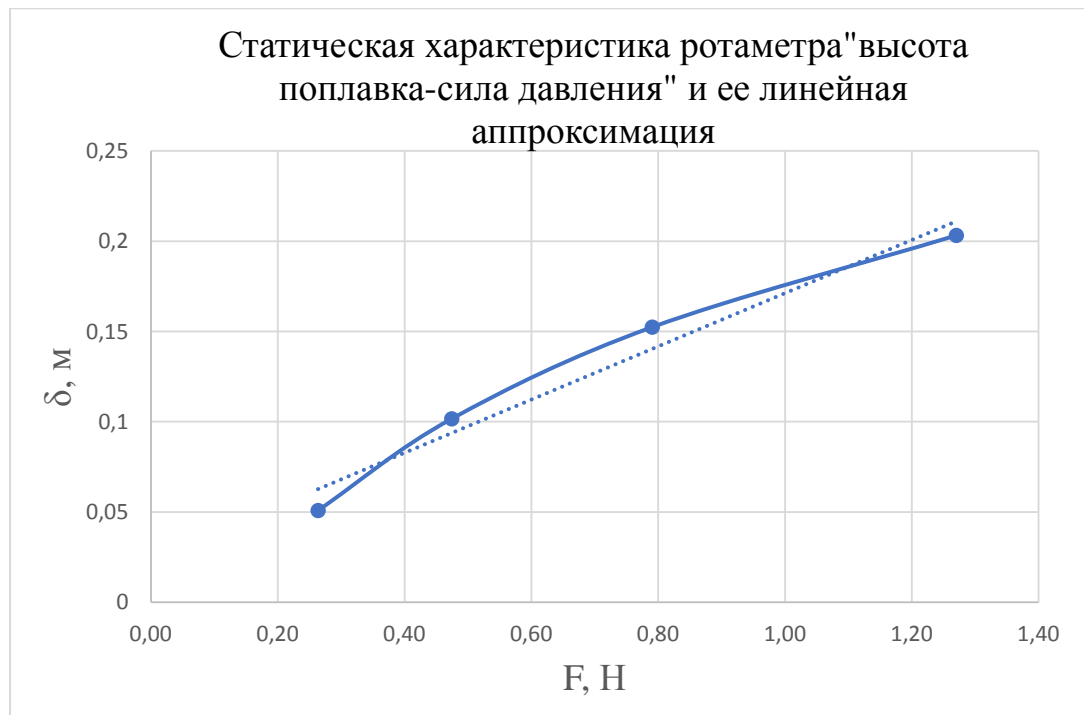


Рисунок 4.21 – Зависимость положения поплавок от силы полного давления (статическая характеристика)

Из графиков на рисунке 4.19 и рисунке 4.20 можно определить чувствительность ротаметра по расходу  $C_Q$  и давлению  $C_p$  [16, с.32]:

$$C_{\delta Q} = \Delta\delta/\Delta Q = (0,1524-0,1016)/(0,000425-0,000286) = 365,467 \text{ с/м}^2, \quad (14)$$

$$C_{\delta p} = \Delta\delta/\Delta P = (0,1524-0,1016)/(14709-8826) = 8,64 \cdot 10^{-6} \text{ м/Па}, \quad (15)$$

где  $\Delta\delta$ ,  $\Delta Q$ ,  $\Delta P$  – приращения высоты поплавок, расхода и избыточного давления на входе ротаметра соответственно. Аналогично находим чувствительность ротаметра по силе полного давления.

$$C_{\delta F} = \Delta\delta/\Delta F = (0,152-0,102)/(0,791-0,474) = 0,1577 \text{ м/Н} \quad (16)$$

#### 4.4 Оценка влияния вязкости, плотности и температуры на точность измерений ротаметра

Влияние вязкости, плотности и температуры может проявиться как случайное изменение параметров среды из-за флуктуации состава воздуха (брака) на



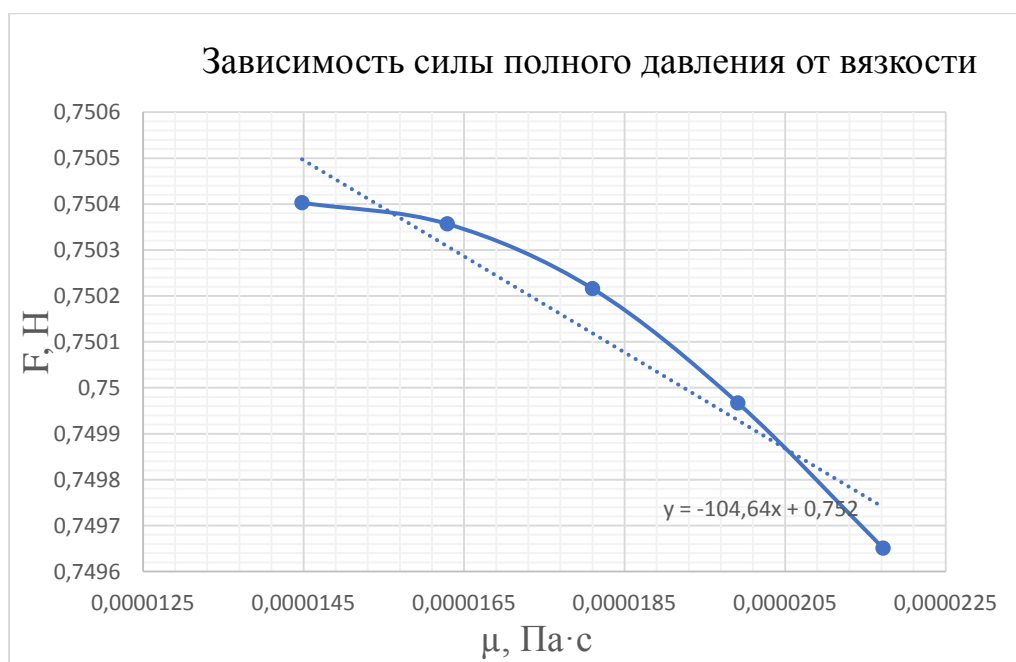


Рисунок 4.22 – Зависимость силы полного давления от вязкости и ее линейная аппроксимация

Осредненная по диапазону эквивалентная чувствительность составляет:

$$C_{F\mu} = -104,64 \text{ Н}/(\text{Па}\cdot\text{с})$$

2) Влияние плотности. Для оценки влияния плотности газа на точность измерений произведен численный расчет на имитационной модели в среде Flow Simulation, в котором проведено варьирование плотности в окрестности ее стандартного значения. Результаты расчетов представлены на графике 4.23.

Таблица 6 – Данные, полученные в ходе эксперимента

F, Н	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1,14786	1,80697
1,02032	2,86293
0,51016	7,08737
0,25508	9,20024



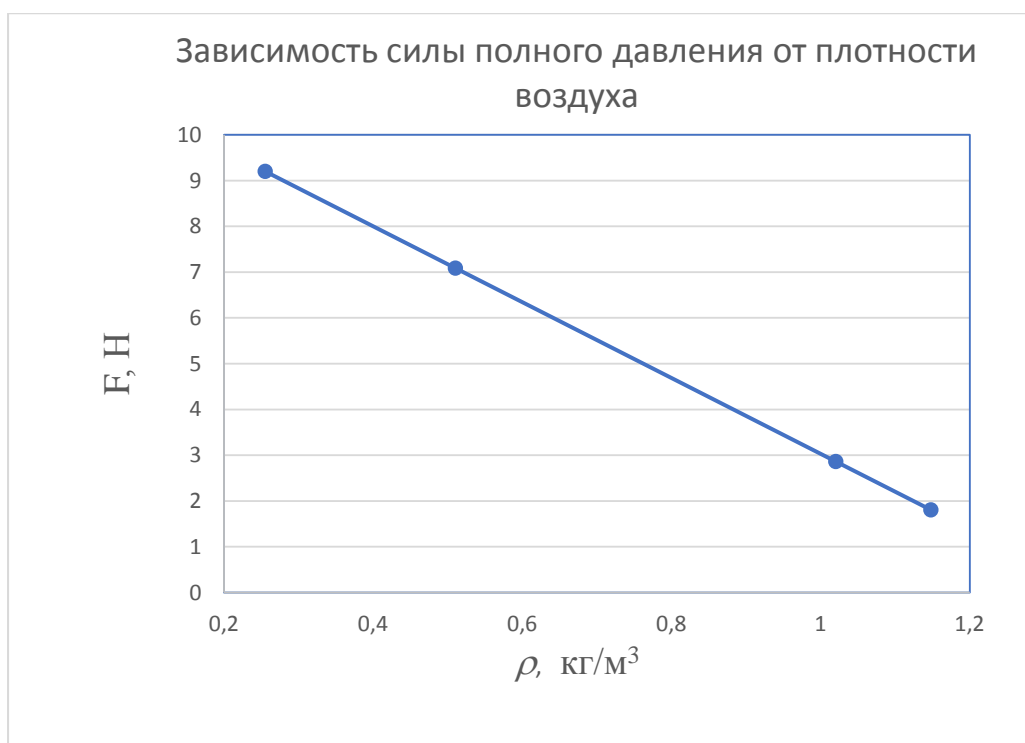


Рисунок 4.23 – Зависимость силы полного давления от плотности и ее линейная аппроксимация

Чувствительность по этим параметрам составляет:  $C_{F\rho} = -8,2811 \text{ Н}/(\text{кг}/\text{м}^3)$

3) Влияние температуры. Для оценки влияния температуры газа на точность измерений произведен численный расчет на имитационной модели в среде Flow Simulation, в котором проведено варьирование температуры в окрестности ее стандартного значения. Результаты расчетов представлены на графике 4.24. Там же представлена полиномиальная аппроксимация этой зависимости в следующем виде:

$$y = -3 \cdot 10^{-5} x^3 + 0,005 x^2 - 0,2608 x + 4,1751 \quad (17)$$

Продифференцировав по  $x$  данное выражение, находим чувствительность:

$$C = Dy/dx = -9 \cdot 10^{-5} x^2 + 0,01 x - 0,2608 \quad (18)$$

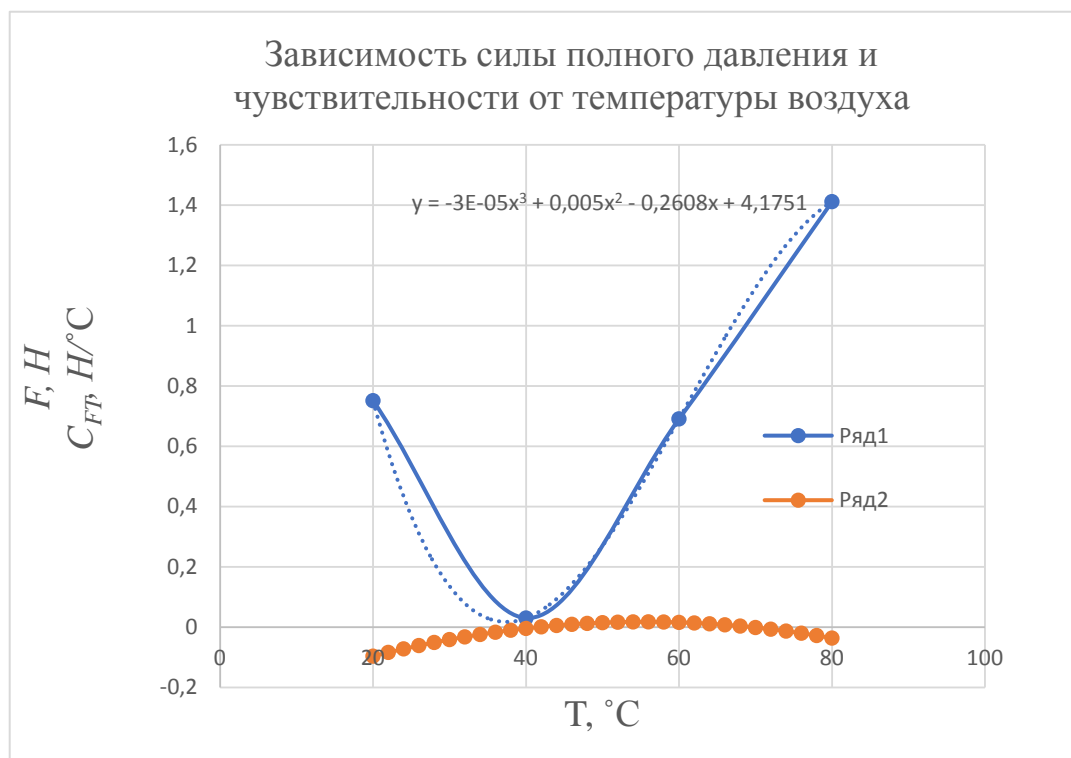


Рисунок 4.24 – Зависимость силы полного давления от температуры и ее полиномиальная аппроксимация:  
 ряд 1 – сила давления; ряд 2 – чувствительность силы давления по температуре  
 $C_{FT}$

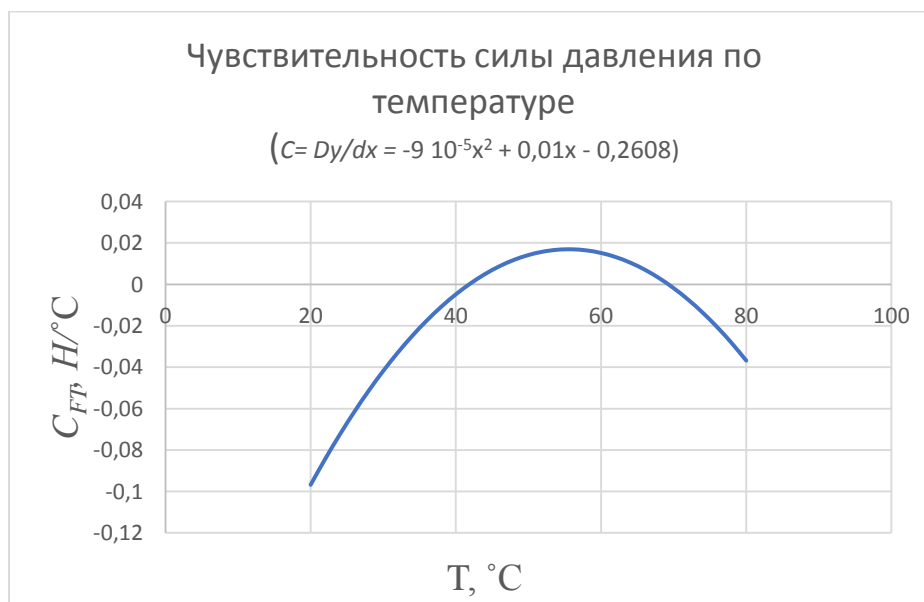


Рисунок 4.25 – Зависимость чувствительности силы полного давления по температуре в увеличенном масштабе; диапазон изменения  $C_{FT} = -0,1 \dots 0,02$

#### 4.5 Чувствительности ротаметра по вязкости, плотности и температуре

По определению [29, с.44] чувствительность преобразователя по какому-либо входному воздействию равна произведению чувствительностей отдельных ступеней преобразования. Исходя из этого, найдем искомые чувствительности ротаметра:

а) Чувствительность по вязкости.

$$C_{\delta\mu} = C_{F\mu} \times C_{\delta F} = -104,64 \times 0,1577 = -16,502 \text{ м/(Па}\cdot\text{с)} \quad (19)$$

Это означает, что если вязкость изменилась на абсолютную величину  $\Delta\mu = 0,000002 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (это примерно 10% от стандартной вязкости воздуха), то это вызовет изменение положения поплавка вниз на величину  $\Delta\delta = 0,000002 \times (-16,502) = -33 \cdot 10^{-7} \text{ м} = -3,3 \text{ мкм}$ . Это не может быть обнаружено визуально по шкале прибора.

б) Чувствительность по плотности

$$C_{\delta\rho} = C_{F\rho} \times C_{\delta F} = -8,2811 \times 0,1577 = -1,306 \text{ м/(кг/м}^3\text{)} \quad (20)$$

Это означает, что если плотность изменилась на абсолютную величину  $\Delta\rho = 0,1 \text{ кг/м}^3$  (это примерно 10% от стандартной плотности воздуха), то это вызовет изменение положения поплавка вниз на величину  $\Delta\delta = 0,1 \times (-1,306) = -0,1306 \text{ м} = -130 \text{ мм}$ . Естественно, такие изменения плотности воздуха в природе маловероятны и речь может идти о сотых или тысячных долях процента.

в) Чувствительность по температуре

Дополнительная погрешность ротаметров, вызванная отклонением температуры окружающего воздуха от нормальной до предельно допускаемых значений, не должна превышать 0,5 предела допускаемой основной погрешности на каждые 10°C изменения температуры [29, с.51].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

$$C_{\delta T 1} = C_{FT} \times C_{\delta F} = -0,1 \times 0,1577 = -0,01577 \text{ м/}^\circ\text{С} \quad (21)$$

$$C_{\delta T 2} = C_{FT} \times C_{\delta F} = 0,02 \times 0,1577 = 0,003154 \text{ м/}^\circ\text{С} \quad (22)$$

Это означает, что если температура изменилась на абсолютную величину  $\Delta T = 2^\circ\text{С}$  (это 10% от стандартной температуры), то это вызовет изменение положения поплавка на величину:

$$\Delta\delta 1 = 2 \times (-0,01577) = -0,03154 \text{ м}$$

$$\Delta\delta 2 = 2 \times 0,003154 = 0,006308 \text{ м}$$

#### 4.6 Погрешности ротаметра при случайном изменении вязкости, плотности и температуры

Класс точности ротаметра составляет  $\pm 2,5\%$  от верхнего предела измерения. Температурная погрешность ротаметра не должна превышать 0,5 абсолютного значения основной допускаемой погрешности на  $10^\circ\text{С}$  отклонения температур окружающего воздуха от  $20^\circ\text{С}$  в диапазоне температур от минус 5 до плюс  $50^\circ\text{С}$  для ротаметров типа РМ [28, с.22].

1) Погрешность при изменении температуры. Под погрешностью  $\Delta X$  при изменении температуры понимаем изменение положения поплавка от номинального  $X_0$  до текущего  $X_T$  при новом случайном значении температуры ( $\Delta X = X_0 - X_T$ ). Тогда под относительной погрешностью будем понимать следующее выражение [6, с.65]:

$$X = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100\% \quad (23)$$

Задаем изменение температуры  $\Delta T = 2^\circ\text{С}$ , что составляет 10% от номинального значения температуры т.е.  $20^\circ\text{С}$ . С помощью выражений (21) и (22) для чувствительности по температуре находим соответствующие значения  $\Delta X$ :

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

$$\Delta X_{1T} = \Delta T \cdot C_{\delta T 1} \quad (24)$$

$$\Delta X_{2T} = \Delta T \cdot C_{\delta T 2} \quad (25)$$

$$\Delta X_{1T} = (-0,01577) \cdot 2^\circ\text{C} = -0,03154 \text{ м} \quad (26)$$

$$\Delta X_{2T} = 0,003154 \cdot 2^\circ\text{C} = 0,006308 \text{ м} \quad (27)$$

Тогда относительная погрешность:

$$\lambda_{X_{1T}} = \frac{\Delta X_{1T}}{X_0} \cdot 100\% \quad (28)$$

$$\lambda_{X_{2T}} = \frac{\Delta X_{2T}}{X_0} \cdot 100\% \quad (29)$$

$$\lambda_{X_{1T}} = 0,03154 / 0,218 \cdot 100\% = 14,4567\% \quad (30)$$

$$\lambda_{X_{2T}} = 0,006308 / 0,218 \cdot 100\% = 2,8835\% \quad (31)$$

2) Погрешность при изменении вязкости.

Задаем изменение вязкости  $\Delta\mu = 0,0002$  Па·с, что составляет 10% от номинального значения вязкости т.е.  $18,1 \cdot 10^{-6}$  Па·с. С помощью выражения (19) для чувствительности по вязкости находим соответствующее значение  $\Delta X$ :

$$\Delta X_{\mu} = \Delta\mu \cdot C_{\delta\mu 2} \quad (32)$$

$$\Delta X_{\mu} = 0,0002 \cdot 16,502 = 0,0033 \text{ м} \quad (33)$$

Тогда относительная погрешность:

$$\lambda_{X_{\mu}} = \frac{\Delta X_{\mu}}{X_0} \cdot 100\% \quad (34)$$

$$\lambda_{X_{\mu}} = 0,0033 / 0,218 \cdot 100\% = 1,5137\% \quad (35)$$

3) Погрешность при изменении плотности.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Задаем изменение плотности  $\Delta\rho=0,012754 \text{ кг/м}^3$ , что составляет 1% от номинального значения плотности т.е.  $1,2754 \text{ кг/м}^3$ . С помощью выражения (20) для чувствительности по плотности находим соответствующее значение  $\Delta X$ :

$$\Delta X_p = \Delta\rho \cdot C_{\delta\rho 2} \quad (36)$$

$$\Delta X_p = 0,012754 \cdot (-1,306) = -0,0167 \text{ м} \quad (37)$$

Тогда относительная погрешность:

$$\lambda_{X_p} = \frac{\Delta X_p}{X_0} \cdot 100\% \quad (38)$$

$$\lambda_{X_p} = 0,0167 / 0,218 \cdot 100\% = 7,66\% \quad (39)$$

Данный ротаметр не удовлетворяет паспортным требованиям по температуре.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был проведен аналитический обзор литературы, который показывает, что расходомеры постоянного перепада давления занимают существенную нишу на мировом рынке расходомеров, обладая простотой конструкции, дешевизной и сравнительно высокой точностью измерения. Во второй главе были изучены различные конструкции ротаметров с поплавками различной конфигурации и показано что поплавки дисковой и тарельчатой формы менее всего чувствительны к изменению вязкости измеряемой среды. Для оценки влияния на метрологические характеристики параметров воздуха были рассмотрены различные численные среды моделирования. Выявлено что все они используют конечно-элементный метод расчета, обладая сравнительно одинаковыми возможностями, но существенно отличаются по интерфейсу пользователя. Поэтому в своей работе я использовала среду Solid Works со встроенной в нее системой Flow Simulation.

В результате численного анализа в среде Flow Simulation были получены следующие результаты:

1) Были идентифицированы неизвестные геометрические параметры поплавка и, в частности,  $R_{\text{п}} = 0,00728$  м,  $S_{\text{п}} = 5,357 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>;

2) Были определены чувствительности ротаметра по вязкости, плотности и температуре которые составляют:

$C_{\delta\mu} = -16,502$  м/(Па·с) чувствительность по вязкости;

$C_{\delta\rho} = -1,306$  м/(кг/м<sup>3</sup>) чувствительность по плотности;

$C_{\delta T1} = -0,01577$  м/°С чувствительность по температуре;

$C_{\delta T2} = 0,003154$  м/°С чувствительность по температуре.

									Лист
									73
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР				

3) Погрешности измерений ротаметра при случайном изменении вязкости, плотности и температуры, которые составляют:

$\lambda_{X1T}=14,4567\%$  максимальная погрешность по температуре на 10% от номинального значения;

$\lambda_{X2T} = 2,2835\%$  минимальная погрешность по температуре;

$\lambda_{X\mu}=1,5137\%$  погрешность измерения по вязкости на 10% от номинального значения;

$\lambda_{X\rho}=7,66\%$  погрешность измерения по плотности на 1% от номинального значения.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						74
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baker, R.C. Flow Measurement Handbook / R.C. Baker. – Cambridge University Press, 2016. – 794 p.
2. SOLIDWORKS Flow Simulation. – <https://plm-group.ru/товары/программа/solidworks-flow-simulation/>.
3. Алямовский, А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 693 с.
4. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
5. Андронов, И.В. Измерение расхода жидкостей и газов / И.В. Андронов – М.: Энергоиздат, 1981. – 90 с.
6. Атамаян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебное пособие / Э.Г. Атамаян. – Москва: Высшая школа, 1982. – 223 с.
7. Ахмеджанов, Р.А. Физические основы получения информации: учебное пособие / Р.А. Ахмеджанов, А.И. Чередов. – Омск: ОмГТУ, 2008. – 184 с.
8. Бриндли, К. Измерительные преобразователи: справ. Пособие / К. Бриндли. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
9. Бриндли, К. Электронные контрольно-измерительные приборы / К. Бриндли. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
10. ГОСТ 8.586.1-5–2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: ИПК Издательство стандартов, 2007.
11. Диденко, В.И. Метрология и электроизмерительная техника / В.И. Диденко, В. Ю. Кончаловский. – Москва: МЭИ, 2005. – 215 с.
12. Дударева, Н.Ю. SolidWorks 2009 на примерах / Н.Ю. Дударева, С.А. Загайко. – СПб: БХВ –Петербург, 2009. – 544 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						75
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

13. Евтихийев, Н.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихийев, В.Н. Скуторов. – Москва: Энергоатомиздат, 2003. – 325 с.
14. Зайцев, С.А. Метрология, стандартизация и сертификация в машиностроении: учебник / С.А. Зайцев, А.Н. Толстов, Д.Д. Грибанов, А.Д. Куранов. – Москва: Академия, 2015. – 288 с.
15. Кочевский, А. Н. Возможности моделирования течений жидкости и газа с помощью современных программных продуктов, 2005/ А. Н. Кочевский – Сума: Издательство СумГУ, 2005. – 36с.
16. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 409 с.
17. Кремлевский, П.П. Расчет и конструирование расходомеров: справ. пособие / П.П. Кремлевский. – Москва: Машиностроение, 1978. – 224 с.
18. Кузнецов, В.А. Основы метрологии / В.А. Кузнецов, Г.В. Ялунина. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 336с.
19. Левшина, Е.С. Электрические измерения физических величин / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
20. Лепявко, А. П. Расходомеры и счетчики жидкости и газа. Поверка и калибровка. Учебное пособие/ А. П. Лепявко – М: АСМС, 2005 – 99 с.
21. Мордасов, Д.М. Физические основы измерений / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-т, 2002. – 32 с.
22. МУ44-75 Методические указания по пересчету градуировочных характеристик расходомеров постоянного перепада давления. М.: ИПК Издательство стандартов, 1975.
23. Николаева, Е.В. ФОПИ: Измерительные преобразователи. Принципы измерения физических величин: учебное пособие / Е.В. Николаева, В.В. Макаров. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 96 с.
24. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

25. Селиванов, М.Н. Качество измерений: метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшов. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
26. Сергеев, А.Г. Метрология: учебное пособие для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – Москва: Логос, 2001. – 408 с.
27. Сутулов, А.Н. Стенд учебный СИУ-01. Измерительные преобразователи давления и расхода газа и жидкости в условиях генерации влияющих воздействий / А.Н. Сутулов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 36 с.
28. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – Москва: Высшая школа, 2008. – 182 с.
29. Тюрин, Н.И. Введение в метрологию / Н.И. Тюрин. – Москва: Изд-во стандартов, 2004. – 111 с.
30. Форенталь, М.В. Стенд учебный СИУ-01 “Измерительные преобразователи давления и расхода газа и жидкости в условиях генерации влияющих воздействий”: Руководство по эксплуатации СИУ-01-00-000-000 РЭ / М.В. Форенталь, С.Б. Сапожников – Челябинск: Изд-во Учтех-Профи, 2011. – 19 с.
31. Хлебнова, В.И. Методы и средства измерения расхода жидкости и газа: перспективы применения ультразвуковых преобразователей с широким измерительным лучом / В.И. Хлебнова. – СПб: СПбГУ, 2016. – 52 с.
32. Шабалдин, Е.Д. Метрология и электрические измерения / Е.Д. Шабалдин, Г.К. Смолин, В.И. Уткин. – Екатеринбург. 2009. – 24 с.
33. Шишмарев, В.Ю. Метрология, стандартизация, сертификация и техническое регулирование / В.Ю. Шишмарев. – Москва: Академия, 2015. – 320 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2019.306 ПЗ ВКР	Лист
						77
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		