

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.

Методы коррекции ошибок кориолисова расходомера при многофазных измерениях

(наименование темы работы (проекта))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ЮУрГУ-12.03.01.2019. 329 ПЗ ВКР

(код направления/специальности, год, номер студенческого)

Руководитель, доцент

_____/ О.Ю. Бушуев /

« ____ » _____ 2019 г.

Автор

студент группы КЭ – 463

_____/ В.А. Свитайло /

« ____ » _____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент

_____/ А.С. Волосников /

« ____ » _____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Свитайло В.А. Методы коррекции ошибок кориолисова расходомера при многофазных измерениях – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ - 463, 2019, 74 с, 35 ил., библиогр. список – 25 наим.

В данной работе проведен анализ существующих методов по измерению расхода многофазных сред и выделены основные аспекты, влияющие на показания приборов. Рассмотрены методы коррекции ошибок кориолисова расходомера при многофазных измерениях. Было произведено моделирование двухфазного потока, а также моделирование сигнала кориолисова расходомера. Также был проведен выбранный эксперимент в лаборатории «Интеллектуальных датчиков и исполнительных механизмов» на кафедре «Информационно-измерительная техника». В данной работе использована программа MATLAB. Пояснительная записка к данной работе оформлена в MS Word 2016.

Целью ВКР является исследование методов коррекции ошибок кориолисова расходомера при многофазных измерениях

Задачи:

- 1) рассмотреть строение и принцип действия кориолисова расходомера;
- 2) изучить причины появления погрешностей при измерении многофазного потока;
- 3) исследование методов коррекции ошибок в расходомере;
- 4) моделирование эксперимента с применением методов коррекции ошибок.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	Свитайло В.А.				МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА ПРИ МНОГОФАЗНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проз.</i>	Бушук О.Ю.						3	
<i>Н.контр.</i>	Волосников А.С.				ЮУрГУ Кафедра ИНИТ			
<i>Утв.</i>	Лапин А.П.							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА	7
1.1 Принцип работы кориолисовых расходомеров	7
1.2 Механизмы влияния дисперсной фазы на механический отклик кориолисова расходомера.....	10
1.3 Причин потери точности кориолисовых расходомеров в многофазных потоках.....	17
2 МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА	24
2.1 Влияние давления на точность измерения массового расходомера Кориолиса (метод демпфирования).....	24
2.2 Самодиагностирующийся датчик SEMA	30
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА	36
3.1 Математическая модель Кориолисова расходомера	36
3.2 Моделирование газожидкостного потока.....	40
3.3 Модель сигналов с сенсоров кориолисового расходомера для двухфазной среды	44
4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	48
4.1 Метод самодиагностики SEVA датчиков.....	48
4.2 Метод демпфирования	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	62

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	4
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

4) Обработка экспериментальных данных и подтверждение работоспособности предложенного метода

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

1 КОРИОЛИСОВ РАСХОДОМЕР

1.1 Принцип работы кориолисовых расходомеров

Кориолисовый расходомер состоит из датчика расхода и электронного преобразователя. С помощью датчика идет преобразование расхода, плотности и температуры в электрические сигналы. Для получения цифрового сигнала и стандартных выходных сигналов используется электронный преобразователь, который конвертирует информацию с датчика.

Измеряемая масса проходит через две изогнутые симметричные трубки, которые колеблются с определенной частотой. Форма колебаний одной из этих трубок показана на рисунке 1. Электромагнитная катушка заставляет колебаться трубки с определенной частотой.

Измеряемой среде, проходящей через трубку, придается вертикальная составляющая движения вибрирующей трубки. При движении вверх во время первой половины цикла колебания (рисунок 1.2) жидкость, втекающая в трубку, создает сопротивление движению вверх, давя на трубку вниз. Поглотив вертикальный импульс при движении вокруг изгиба трубки, жидкость, вытекающая из трубки, сопротивляется уменьшению вертикальной составляющей движения, толкая трубку вверх. Это приводит к закручиванию трубки (рисунок 1.3). Когда трубка движется вниз во время второй половины цикла колебания, она закручивается в противоположную сторону. Это закручивание называется эффектом Кориолиса.

Исходя из второго закона Ньютона, угол закручивания трубки датчика прямо пропорционален количеству жидкости, проходящей через трубку в единицу времени. С каждой стороны трубки расположены электромагнитные катушки детекторы, снимающие сигнал, который соответствует колебаниям трубки. Измерив время задержки между сигналами детектора, мы определим массовый расход. В случае, если через трубки не протекает измеряемая среда, то не

									Лист
									7
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

период колебаний, зная эти данные можно узнать массу измеряемой среде из произведения плотности и внутреннего объема.

Рассмотрим сначала часть жидкости, движущейся наружу в одной половине U-образной трубки. У него будет определенный момент импульса. Когда он движется наружу, а труба вращается вверх, угловой момент будет увеличиваться, поскольку тот же кусок жидкости будет находиться на большем радиусе от шарнира и поэтому должен будет двигаться с большей скоростью. Для достижения этого необходимо приложить усилие к жидкости в направлении вверх. В результате жидкости будет прикладываться усилие, направленное вниз на трубу. Теперь рассмотрим другую половину U-образной трубки, где жидкость движется внутрь, и другую часть жидкости. Когда этот элемент движется внутрь, его угловой момент будет уменьшаться, поскольку поперечная скорость трубки будет меньше. Следовательно, труба должна будет прикладывать усилие вниз к части жидкости, и это, в свою очередь, будет прикладывать усилие вверх к трубе. Поэтому принцип действия основан на использовании ускорения Кориолиса. Это ускорение создается потоком жидкости через расходомерную трубку, движение которой является вибрацией, а не чистым вращением. Силы по сути одинаковы, но чередуются. Вибрация происходит таким образом, что один конец по существу неподвижен, а другой конец вибрирует через дугу. Когда труба поднимается, силы достигают максимума, когда она проходит среднюю плоскость, и в верхней части движения силы становятся равными нулю, и поворот прекращается. По мере того, как U-образная трубка опускается, силы изменяются, и поворот поворачивается, так что снова в средней плоскости поворот становится максимальным. Тогда становится очевидным, что, если измерены времена прохождения двух половин U-образной трубки за средней плоскостью, разница будет связана с изгибом в трубе и, следовательно, с массовым расходом через трубу.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

1.2 Механизмы влияния дисперсной фазы на механический отклик кориолисова расходомера

Для измерения массового расхода в основном используют расходомеры на основе силы Кориолиса, так как они способны с точностью до 0,05% измерить расход и до 0,0002г/см³ плотность.

Принцип действия МКР основан на наблюдениях за движениями чувствительного элемента - изогнутого участка трубопровода, подвергнутого вынужденным колебаниям в направлении, перпендикулярном потоку. В присутствии движущейся среды такие колебания приводят к возникновению распределенных вдоль трубы осциллирующих сил инерции (кориолисовых сил) с суммарным моментом, возбуждающим изгибные колебания чувствительного элемента (измерительной трубы). Непосредственно измеряемой величиной является обычно сдвиг по фазе между колебаниями краев измерительной трубы

$$\Delta\Phi = 2\pi(\Delta\tau/T_c), \quad (1)$$

где T_c - период изгибных (кориолисовых) колебаний измерительной трубы; $\Delta\tau$ - запаздывание по времени между фазами колебаний ее краев, чаще всего - отрезок времени между прохождениями краями плоскости механического равновесия.

Если предположить, что частицы текучей среды (флюида) испытывают в процессе измерений те же поперечные смещения, что и стенки трубы, тогда наблюдаемый сдвиг (1.1) удастся однозначно связать с массовым расходом флюида. Это предположение вполне оправдывается, если жидкость однородна, несжимаема и целиком заполняет объем трубы, то есть, если изучается однофазный поток несжимаемой жидкости. При наличии нескольких фаз или компонентов разной плотности это предположение несправедливо и приводит к ошибкам, уровень которых намного превосходит таковой для однородных текучих сред и неприемлем для многих приложений МКР.

По-видимому, вопрос о корректных способах измерения массовых расходов и плотности транспортируемой многофазной текучей среды с помощью МКР возник

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

вместе с появлением самих МКР, а интерес к его решению поддерживался и поддерживается до сих пор успехами применения этого вида расходомеров в однофазном случае. Разные стороны этого вопроса изучались во множестве исследований. Они позволили к настоящему времени существенно продвинуться на главных направлениях его решения:

1. Понимание физических механизмов воздействия многофазного потока на чувствительные элементы расходомера.

2. Создание работоспособных аналитических и численных моделей этого взаимодействия, позволяющих правильно интерпретировать опытные данные.

3. Разработка конструкции МКР, обеспечивающей необходимую чувствительность прибора по отношению к эффектам многофазности потока.

4. Аппаратное и программное обеспечение процесса измерений.

Уменьшение уровня ошибок МКР, вызванных многофазностью потока, возможно в результате дальнейшего прогресса в указанных выше направлениях.

В последние годы ведущие производители МКР (например, Micro Motion) установили высокий приоритет исследованиям по повышению точности измерений параметров многофазных потоков. Были разработаны экспериментальные установки для изучения влияния газа на работу МКР различных конструкций и получены огромные объемы данных, большая часть которых не имеет особого смысла до тех пор, пока не изучены физические механизмы, вызывающие ошибки измерений. Благодаря осмыслению опытных данных были внесены изменения в электронные системы управления расходомером, позволившие оперативно обрабатывать переходные явления, вызванные, например, прохождением через измерительную трубу крупных пузырей газа при возбуждении снарядного режима течения.

Хотя эти исследования и позволили значительно улучшить характеристики МКР, однако стало ясно, что существенная часть ошибки обусловлена эффектом расщепления фаз, и что, «к сожалению, никакие конструктивные изменения не

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР				

могут отменить законы Ньютона». Стала ясна необходимость лучше понять физические причины падения точности МКР.

Из тех свойств, которые отличают одну фазу от другой, наиболее существенными для работы МКР являются свойства, влияющие на механические движения флюида в целом и составляющих его компонентов. К ним относятся, прежде всего, плотность, а также реологические свойства (вязкость, упругость и пластичность). Важными являются также свойства, зависящие от природы всех сосуществующих фаз - межфазные натяжения, определяющие форму, размеры и расположение частиц дисперсных фаз, термодинамические условия их существования.

Поскольку работа МКР основана на использовании явления инерции, наиболее важным свойством, определяющим отклик прибора на движение флюида, является его плотность. Если флюид состоит только из одной текучей фазы, тогда плотность является величиной хорошо определенной: однородно распределенной по всему объему флюида, не зависящей от выбора контрольного объема, по массе которого судят о плотности в месте расположения этого объема, и от состояния движения флюида. Для многофазных потоков эти свойства уже не имеют места, за исключением редких случаев, когда плотности фаз, составляющих флюид, близки. Если же они заметно различаются, такой флюид не может в земных условиях (в поле тяжести) находиться в однородном состоянии, ни в состоянии покоя, ни в состоянии движения. В состоянии покоя будет происходить пространственное разделение фаз, в результате которого более плотная фаза окажется внизу сосуда. В состоянии движения к гравитационному механизму разделения фаз добавляется также и инерционный: частицы более плотной фазы труднее изменяют состояние своего движения в тех местах, где поток движется с ускорением и поэтому концентрируются вблизи или на поверхностях, ограничивающих поток в этих местах. Эти процессы инерционного разделения фаз давно и широко используются в технике. Заметим, однако, что при движении флюида может происходить и противоположный процесс - перемешивание компонентов и гомогенизация потока,

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	12
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

возникающий вследствие того, например, что одна из фаз течет в турбулентном режиме. Таким образом, в движущихся неоднородных потоках процесс разделения фаз может как усиливаться, так и ослабляться в зависимости от характера потока и свойств частиц, составляющих отдельные фазы.

Если флюид - однородная и несжимаемая жидкость, целиком заполняющая измерительную трубу, тогда центр масс (ЦМ) в каждом ее поперечном сечении остается неподвижным относительно стенок трубы во все время движения. Если помимо жидкости (непрерывной фазы) в потоке присутствует вторая фаза, дисперсная или нет, тогда предыдущее утверждение оказывается неверным, и теория, связывающая наблюдаемые параметры движения чувствительного элемента МКР с потоками фаз, нуждается в коррекции или пересмотре.

Если дисперсная фаза более плотная по сравнению с непрерывной, тогда при ускоренном движении трубы частицы этой фазы имеют меньшее ускорение и ЦМ смещается в направлении, противоположном ускорению. Наоборот, менее плотные частицы дисперсной фазы приобретают большее ускорение и смещаются в направлении ускорения. Этот механизм смещения ЦМ называют «расцеплением фаз». Смещение центра масс смеси в поперечном сечении трубы при ее ускоренном движении показано на рисунке 7. Эффекты расцепления фаз тем более существенны, чем больше разница их плотностей, как, например, в потоках жидкость-газ, газ-твердое тело.

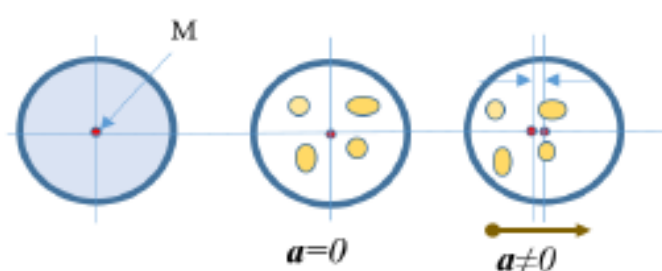


Рисунок 7 – Смещение центра масс смеси в поперечном сечении трубы при ее ускоренном движении

В связи с МКР-технологией измерения многофазных потоков явление расцепления фаз изучалось теоретически и экспериментально в работах. В них был

рассмотрен простейший случай, когда изолированные пузырьки газа и твердые частицы сферической формы всплывают/тонут в вертикальной трубе, заполненной жидкостью (водой) и испытывающей колебания в горизонтальном направлении. Уравнения движения для дисперсных частиц в неинерциальной системе отсчета, связанной с трубой, обезразмериваются и решаются с использованием различных граничных условий. Теоретические предсказания для отношения амплитуд колебаний частица/труба и для сдвига фаз между ними проверялись экспериментально с помощью скоростной видеосъемки. Показано, что для расцепления фаз следующие факторы являются существенными:

1. Параметры установки - частота и амплитуда колебаний измерительной трубы.
2. Физико-химические свойства жидкости - плотность и вязкость (влияние капиллярных свойств, видимо, не изучалось).
3. На основании этих исследований авторы рекомендуют для уменьшения ошибок измерений, связанных с эффектом расцепления фаз.
4. Уменьшать размер пузырьков путем турбулентного перемешивания потока.
5. Уменьшать, насколько возможно, рабочую частоту колебаний МКР и увеличивать их амплитуду.

В работах получены также оценки для величины рассеиваемой мощности, ошибок в плотности и других параметров, представляющих интерес при проектировании и эксплуатации МКР для многофазных потоков. Утверждается, что:

1. Рассеиваемая мощность определяется, в первую очередь, фазовым сдвигом между колебаниями сферы и жидкости.
2. Ошибка в плотности контролируется, в основном, отношением амплитуд колебаний сфера/жидкость.

С математической точки зрения задача о движении сферических тел, погруженных в осциллирующую жидкость, не является простой, и много усилий было потрачено на разработку надежных численных методов ее решения даже в

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	14
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

простейших случаях течений Стокса. Такой подход малопригоден для инженерных целей, особенно если движение сферы нужно отслеживать в режиме реального времени и без использования суперкомпьютера. Один из работоспособных вариантов решения этой проблемы был предложен в.

Помимо эффектов расщепления фаз в МКР может наблюдаться снижение точности от акустических эффектов, проявляющихся, когда скорость звука в измеряемой жидкости мала или частота колебаний расходомера велика. Скорость звука в жидкости больше, чем в газе, но самые низкие скорости наблюдаются в смесях этих двух фаз. Добавление даже небольшого количества газа в жидкость приводит к резкому снижению скорости звука в смеси, ниже, чем в любой из фаз.

Скорость звука в смеси c_m определяется как:

$$c_m = \sqrt{\frac{B_m}{\rho_m}}, \quad (2)$$

где B_m - объемный модуль упругости смеси, а ρ_m - ее плотность.

Небольшое количество газа резко увеличивает сжимаемость смеси, уменьшая B_m , в то время как плотность ρ_m смеси остается близкой к плотности жидкости. Сжимаемость смеси аналогична жесткости составной пружины, состоящей из нескольких пружин, соединенных последовательно; каждой пружине отвечает сжимаемость данного компонента или фазы жидкости. Высокая сжимаемость газовой фазы аналогична мягкой пружине, и сжимаемость полученной смеси будет высока. Распространено заблуждение по поводу того, почему скорость звука в смесях падает. Часто считают, что волны давления сталкиваются с фазовыми границами и замедляются. На самом деле, уменьшение скорости звука происходит целиком из-за того, что сжимаемость резко возрастает при появлении всего только нескольких пузырьков, в то время как плотность смеси остается высокой.

Колебания трубки расходомера возбуждают звуковые волны, колебания частиц в которых происходит в поперечном направлении на частоте возбуждения прибора. Когда скорость звука во флюиде высока, как в однофазной жидкости,

									Лист
									15
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

первая акустическая мода для поперечных звуковых волн поперек круглого трубопровода имеет гораздо более высокую частоту, чем частота привода. Однако, когда скорость звука падает из-за добавления к жидкости газа, частота акустической моды также падает. Когда частота акустической моды и частота привода близки, возникают ошибки измерений из-за нерезонансного возбуждения акустической моды модой привода. В целом, моды колебаний структуры или жидкости, близкие по частоте к частоте привода, приводят к ошибкам измерений МРМ. Для низкочастотных МКР и типичных давлений процесса

акустические эффекты, присутствующие в многофазных потоках, обычно пренебрежимо малы по отношению к заданной точности прибора. Однако для высокочастотных МКР, работающих при низких давлениях с пузырьковыми жидкостями, скорость звука может оказаться достаточно низкой, чтобы вызвать существенные ошибки измерений из-за взаимодействия между приводом и вибрационными модами жидкости.

Более физическим объяснением звуковых эффектов в МКР является то, что жидкость в трубе сжимается вблизи стенки при каждом колебании, если сжимаемость смеси достаточно высока. Таким образом, звуковые эффекты аналогичны эффектам развязки фаз в том смысле, что фактически ошибка вызывается перемещением положения ЦМ. Разница заключается в том, что звуковые эффекты приводят к движению более плотной фазы в направлении ускорения трубки, в то время как при расцеплении фаз более плотная фаза движется в направлении, противоположном ускорению трубки. По этой причине оказывается, что акустические ошибки положительны, а ошибки расцепления фаз отрицательны.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	<i>Лист</i>
						16
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

1.3 Причины потери точности кориолисовых расходомеров в многофазных потоках

1.3.1 «Пузырьковый» эффект

При прохождении через кориолисовый расходомер жидкости, содержащей свободный газ, амплитуда колебаний пузырьков газа больше амплитуды колебаний измерительных трубок прибора. В результате этого эффекта возникает дополнительная погрешность расходомера, которую можно оценить по формуле

$$E = -2 \cdot \alpha / (1 - \alpha) \quad (3)$$

где α - объемное содержание свободного газа в жидкости, $0 < \alpha < 1$.

Таким образом, данный эффект приводит к возникновению отрицательной систематической погрешности кориолисова расходомера. Формула (1.3) получена без учета размеров пузырьков, вязкости жидкости и частоты колебаний трубок расходомера; учет влияния этих параметров выполнен в [14].

В горизонтальных трубах распределение фаз по сечению зависит от соотношения сил инерции и Архимеда, определяемого критерием Фруда

$$Fr = W / g \cdot d, \quad (4)$$

где W - характерный масштаб скорости; g - ускорение свободного падения, характеризующие действие внешней силы; d - характерный размер области, в которой рассматривается течение.

При малых значениях скорости потока может произойти расслоение двухфазного потока на жидкую и паровую фазы. На расслоение потока также оказывает влияние и диаметр трубы - чем больше диаметр трубы, тем легче возникает расслоение.

						Лист
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	17
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Область применения теории пузырькового эффекта ограничена, поскольку существенное влияние на поведение свободного газа в жидкости оказывает режим двухфазного потока в измерительной трубке. При горизонтальной установке расходомера получить такой режим на практике практически нереально. Такой режим потока может быть получен только при вертикальной установке прибора, имеющего прямые или слабо изогнутые измерительные трубки.

Режимы течения двухфазного потока в горизонтальных каналах изображены на рисунке 8.

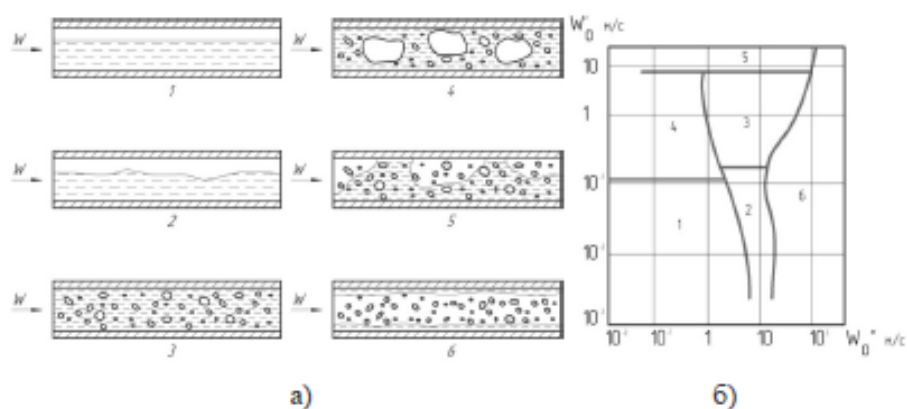


Рисунок 8 – Режимы течения двухфазного потока в горизонтальных каналах: а) режимы двухфазного потока б) диаграмма режимов горизонтальных двухфазных потоков

1.3.2 Эффект резонатора

При прохождении через кориолисовый расходомер жидкости, содержащей пузырьки свободного газа, в измерительных трубках прибора наряду с пузырьковым эффектом возникает так называемый эффект резонатора. Суть этого эффекта заключается в том, что пузырьки, распределенные в жидкости, как бы «захватывают» объем жидкости, действуя на него как пружина (рисунок 1.10). Благодаря этому в поперечном сечении измерительных трубок массового расходомера может возникнуть стоячая волна, резонансная частота которой определяется как

$$f_0 = c \cdot \lambda_1 / (2 \cdot \pi \cdot R_0), \quad (5)$$

где c - скорость звука в жидкости, по объему которой распределены пузырьки газа, $\lambda_1=1,842$ - числовой коэффициент, R_0 - внутренний радиус измерительной трубки.

Принцип эффекта резонатора изображен на рисунке 10. Дополнительную погрешность, возникающую вследствие эффекта резонатора, можно оценить по формуле

$$E_{\text{рез}} = 2 \cdot \left[\left(0,163 + 0,837 \cdot \frac{1}{1 - f_d^2 / f_0^2} \right) - 1 \right], \quad (6)$$

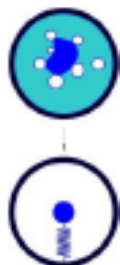
где f_d - частота колебаний измерительной трубки расходомера.

Дополнительная погрешность из-за эффекта резонатора также зависит от содержания свободного газа в жидкости, а также от давления процесса.

Действительно, резонансная частота f_0 прямо пропорциональна скорости звука c в среде, которая в свою очередь зависит от содержания свободного газа и давления процесса.

Частота акустического резонанса, как правило, больше частоты возбуждения измерительных трубок, поэтому дополнительная погрешность вследствие эффекта резонатора больше нуля и при достаточно высокой частоте возбуждения измерительных трубок может частично или полностью скомпенсировать погрешность из-за пузырькового эффекта.

Зависимость скорости звука в двухфазной среде от содержания свободного газа и давления процесса изображена на рисунке 10.



					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Рисунок 9 – Эффект резонатора УМЗ

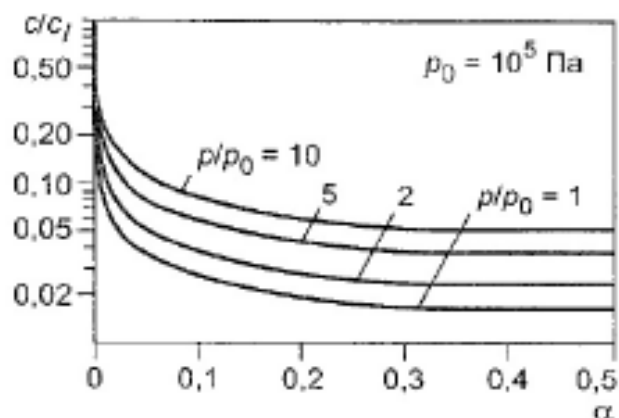


Рисунок 10 – Зависимость скорости звука двухфазной среде от содержания свободного газа и жидкости

Приведенные выше предположения справедливы только для идеальных условий, когда пузырьки свободного газа равномерно распределены по объему жидкости в измерительных трубках. Вывод о том, что при измерении двухфазного потока погрешность кориолисовых расходомеров с достаточно большой частотой возбуждения измерительных трубок (например, со слабоизогнутыми измерительными трубками) оказывается меньше погрешности массометров с низкой частотой возбуждения, находит подтверждение в большом количестве экспериментальных работ.

1.3.3 Эффект неоднородного распределения пузырьков

Трение между жидкостью и пузырьками газа приводит к возникновению так называемой силы затухания. В отличие от силы Кориолиса F^{\wedge} которая на входе в измерительную трубку и на выходе из нее направлена в разные стороны, сила затухания F_z направлена в одну сторону - против направления движения измерительной трубки. Если пузырьки свободного газа вдоль измерительной трубки распределены однородно, то сила затухания на входе в трубку совпадает с силой затухания на выходе из нее. В этом случае она не приводит к

возникновению дополнительной погрешности, поскольку одинаково влияет на показания чувствительных элементов расходомера, расположенных на разных концах измерительных трубок симметрично относительно их середины.

Если же пузыри вдоль измерительных трубок распределены неоднородно, то сила затухания приводит к неконтролируемой случайной погрешности, так как имеет в точках расположения чувствительных элементов непредсказуемо разные значения.

Эффект затухания колебаний изображен на рисунке 11.

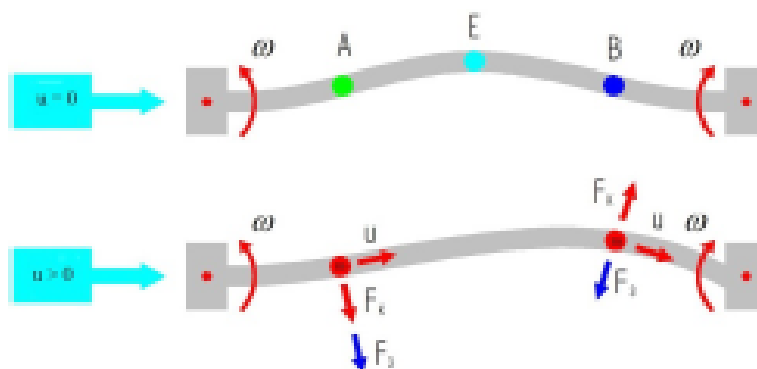


Рисунок 11 – Эффект затухания колебаний

Степень однородности распределения пузырьков зависит от формы измерительных трубок. Например, при горизонтальной установке массомера с U-образными трубками добиться равномерного распределения пузырьков вообще невозможно из-за силы Архимеда, которая на входе в трубку препятствует, а на выходе из нее, наоборот, способствует движению пузырьков (см. рисунок 11). Таким образом, на входе в трубку создается повышенная плотность распределения пузырьков, а на выходе из нее - пониженная. Эксперименты показали, что на самом деле, в отличие от расходомера со слабоизогнутыми трубками, добиться однородного распределения пузырьков в U-образных измерительных трубках не представляется возможным даже при вертикальной установке прибора. В связи с

этим, если говорить об однородности распределения пузырьков газа вдоль трубки расходомер с прямыми трубками является оптимальным. Однако прямотрубные массовые расходомеры характеризуются слишком высокой частотой возбуждения, что может привести к доминированию эффекта резонатора над пузырьковым эффектом.

Течение пузырьков свободного газа в горизонтально установленном расходомере с U-образной измерительной трубкой изображено на рисунке 12.

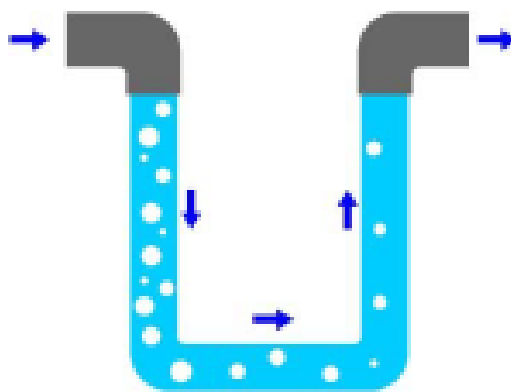


Рисунок 12 – Пузырьки свободного газа в горизонтально установленном расходомере с U-образной измерительной трубкой

Первый источник погрешностей - влияние разности плотностей газа (или твердых частиц) и жидкости, проявляющееся в разделении потока и смещении центра масс трубки (рисунок 13). При таком воздействии расходомер дает заниженную оценку плотности смеси и массового расхода. Также в статье приводится объяснение этого явления и примеры его проявления. Снижение влияния этого эффекта можно добиться уменьшением размера пузырьков газа в жидкости и гомогенизацией потока.

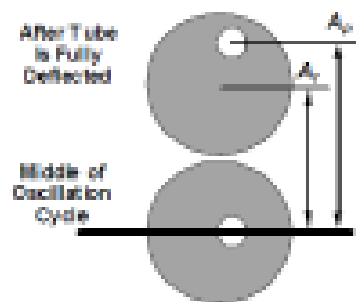


Рисунок 13 – Различия в амплитудах перемещений жидкости и газа

Второй источник погрешностей - появление звуковой волны при низкой скорости звука у смеси, протекающей по трубкам расходомера, приводящее к дополнительным поперечным колебаниям трубок на рабочей частоте. Влияние звуковой волны можно полностью снизить путем использования расходомера с низкой рабочей частотой.

При измерении расхода двухфазного потока (особенно в случае смеси жидкости с газом) расходомеры испытывают ряд проблем, таких как, например, проявление значительных погрешностей измерения и снижение амплитуды колебаний измерительных трубок.

2 МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА

2.1 Влияние давления на точность измерения массового расходомера Кориолиса

Так как измерительные трубки в расходомерах Кориолиса не обязательно длинные трубы, уравнение движения с использованием теории балки Тимошенко является наиболее целесообразным. Для 1D осевого потока и с учетом давления и осевыми напряжениями, основное уравнение для вибрации представлено следующим образом (7), для прямой трубки с текучей средой,

$$\begin{aligned}
 & (\rho_f A_f + \rho_p A_p) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\rho_f A_f v_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \\
 & + [\rho_f A_f v_0^2 - \sigma_0 A_p + \bar{p} A_f (1 - 2\nu\delta)] \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\
 & + kGA_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = 0 \\
 & (\rho_f I_f + \rho_p I_p) \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - kGA_p \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \theta \right) \\
 & - [E + \sigma_0 - \bar{p} A_f (1 - 2\nu\delta) / A_p] I_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

где предполагается, что жидкость течет с равномерной и постоянной скоростью v_0 , в трубе внутренней площадью сечения A_f , плотностью жидкости ρ_f , и имеет момент инерции вращению I_f . Трубка имеет первоначальное осевое напряжение σ_0 , среднее внутреннее давление p , плотность ρ_p , площадь поперечного сечения A_p , момент инерция вращения I_p , модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , модуль сдвига G , и коэффициент коррекции сдвига k . $\delta = 1$, если осевое движение ограничено (например, зажимают-зажат конечное условие), или $\delta = 0$, если не ограничен. Дополнительный член $\bar{p} A_f (2\nu\delta)$ связанный с дополнительным осевым напряжением (растяжением), создаваемым давлением с помощью эффекта Пуассона. В соответствии с этим уравнением, эффект самого давления p

						Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

эквивалентно действию сжимающего осевого напряжения $-\bar{p}A_f / A_p$, как это показано на рис. 14.



Рисунок 14 – Влияние давления эквивалентно осевому напряжению (сжатию) для тонкой трубки с протекающей жидкостью

Экспериментальные результаты получены в работе [3], на рис. 15 показано сравнение с теоретическим расчетом с помощью уравнения. Для низких давлений наблюдается хорошее совпадение, но существует значительная разница, когда давление приближается к пределу продольного изгиба, что может быть объяснено локальной деформации. Как видно из рис. 2 повышенное давление может уменьшить первую основную частоту. Это эквивалентно действию сжимающего напряжения, которое может привести к снижению жесткости трубы.

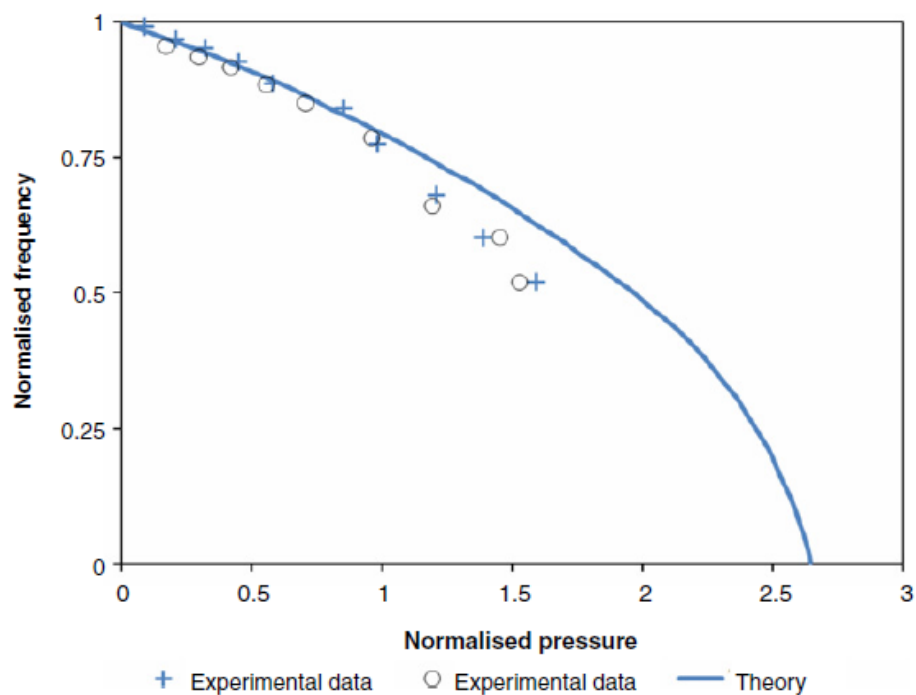


Рисунок 15 – Изменение первой основной частоты из-за давления

Теоретических работ специально направленных на понимание влияния давления на расходомер Кориолиса опубликовано не много. В более ранней работе [4], представлено теоретическое решение эффекта давления транспортирующей жидкости в прямой трубе с использованием теории балки Эйлера-Бернулли. Тем не менее, метод решения не был описан и отмечено, что "численные ошибки округления не позволяют воспроизвести тонкости тренда...". Тем не менее, стоит отметить, что этот документ подчеркивает важность эффекта давления, в частности, для измерения расхода газа под высоким давлением. Аналитическая оценка характеристик Кориолиса потока "была представлена в работе [5] с использованием метода Галеркина для решения уравнения движения на основе теории балки Эйлера-Бернулли. Хотя термин давление явно не появляются в их уравнении движения, эта работа может быть особенно полезно, когда аналитически изучается влияние давления, так как термин давление будет появляться в таком же положении, как и термин осевого усилия. Несколько экспериментальных исследований приведены в [2,6]. В них рассматривается

влияние давления на два поколения расходомеров Кориолиса. Из-за негативных ошибок, замеченных в испытаниях, как показано на рис. 3, снижение отношения сигнал из-за той же массы потока, было указано, что "эффект давления текучей среды, состоит в ужесточении колеблющихся труб" [6]. Это объяснение увеличения жесткости противоречит предсказанию по формуле. (7), который будет подробно обсуждаться далее в этой статье.

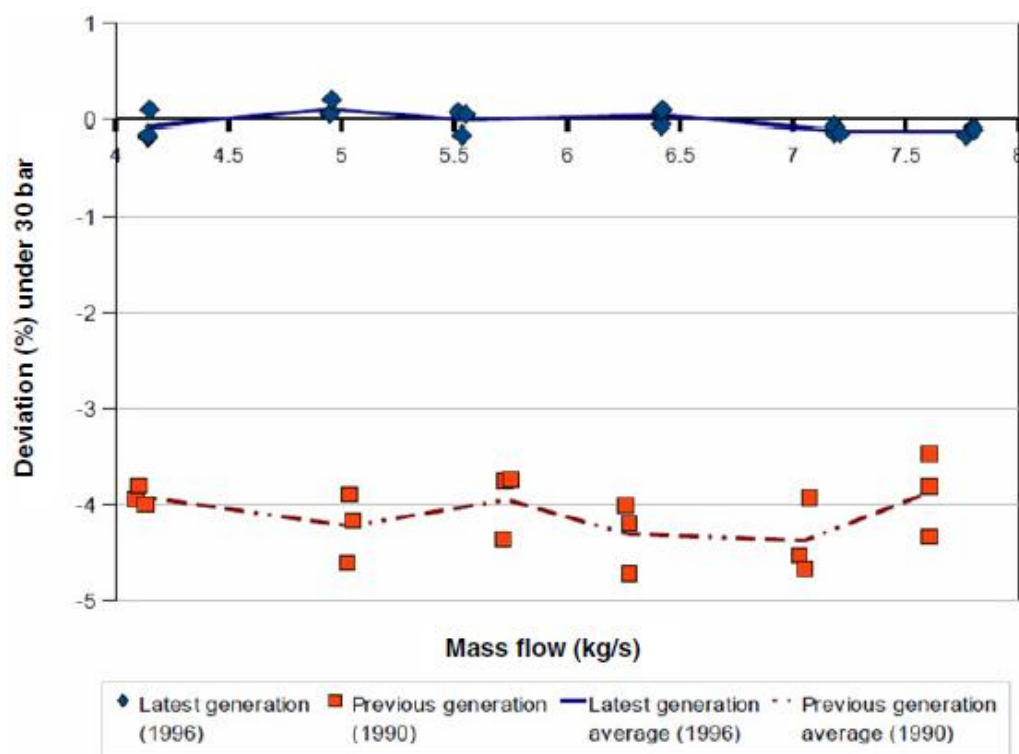


Рисунок 16 – Влияние давления на точность измерений расходомера Кориолиса двух поколений

2.2.1 Промышленные данные

Производители расходомеров Кориолиса обычно проводят испытания, чтобы оценить влияние давления на их продукцию. Влияние давления на точность массового расхода количественно определяются значением чувствительности к давлению s_p , которое обычно определяется как процентное отклонение от

эталонного состояния в барах. На рис. 4-6 показывают эти значения для трех разных производителей [7-14].

Из рис. 4-6, можно видеть, что большинство последних коммерческих продуктов имеют небольшое влияние давления с абсолютными значениями чувствительности к давлению σ_p менее 0,01% в бар, в то время как старое поколение Кориолиса имел довольно значительную величину на 0,13% в бар, как показано на рис. 16.

Еще одно важное замечание, что большинство расходомеров с изогнутыми трубками имеют отрицательное значение σ_p в то время как большинство расходомеров с прямыми трубками имеют положительное значение. Это указывает на то, что результирующий эффект давления на изогнутые и прямые трубки расходомеров Кориолиса, могут быть разными.

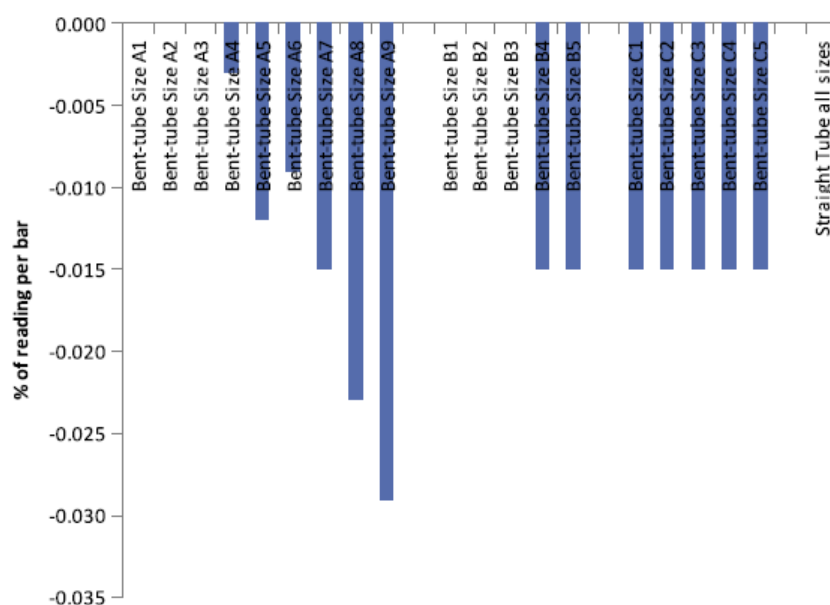


Рисунок 17 – Эффект влияния давления на массовый расход (производитель А)

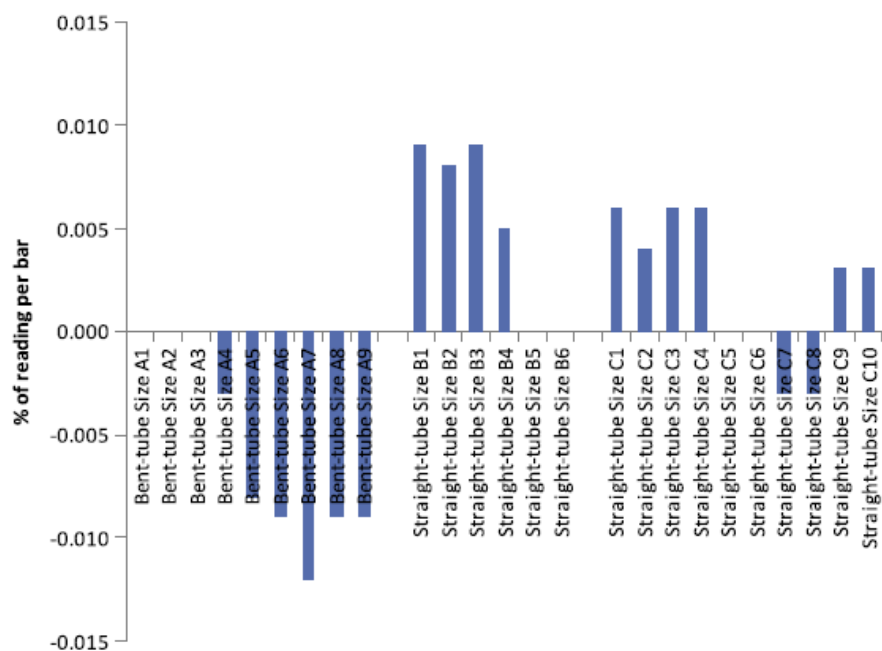


Рисунок 18 – Эффект влияния давления на массовый расход (производитель В)

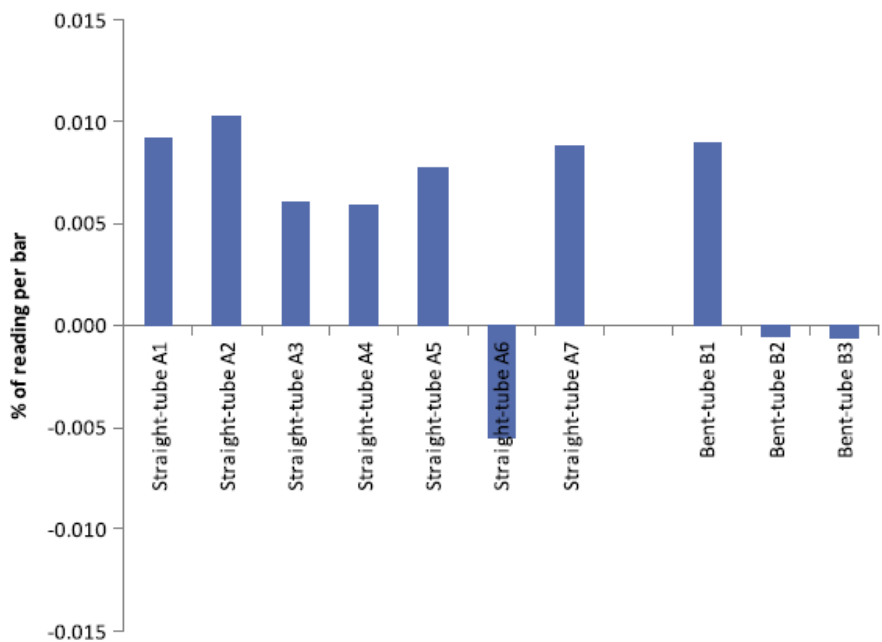


Рисунок 19 – Эффект влияния давления на массовый расход (производитель С)

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

2.2 Самодиагностирующийся датчик SEVA

Исследовательская группа по проверке датчиков в Оксфорде начала в 1988 году исследовать влияние цифровых технологий на приборы, и в частности на локальное обнаружение неисправностей. Он разработал теоретическую модель поведения «самопроверяющегося» или SEVA-инструмента (Henry and Clarke, 1993). Это предполагает наличие внутренней вычислительной мощности для самодиагностики и цифровой связи для передачи данных измерений и диагностики. Для каждого измерения генерируются три параметра:

Проверенное значение измерения (VMV). Это обычное измерение, но если происходит сбой, VMV является скорректированной наилучшей оценкой истинного измеряемого значения.

Подтвержденная неопределенность (VU). Это метрологическая неопределенность или, возможно, ошибка VMV. Например, если VMV составляет 4,31 л / с, а VU - 0,05 л / с, то датчик утверждает, что истинное значение измерения находится в диапазоне от 4,26 л / с до 4,36 л / с с вероятностью 95%.

Состояние значения измерения (статус MV). Принимая во внимание требование обеспечить измерение даже при серьезной ошибке, MV Status показывает, как было рассчитано текущее измерение

В общем случае, измеритель с автоматической проверкой обеспечивает, на основании всей информации, доступной измерителю, наилучшую оценку значения отслеживаемого параметра (например, массового расхода). Поскольку наилучшая оценка базируется, отчасти, на не измерительных данных, наилучшая оценка не всегда согласуется со значением, указанным данными текущего, измерения. Измеритель с автоматической проверкой также обеспечивает информацию о достоверности и надежности наилучшей оценки, а также информацию о рабочем состоянии датчика. Информация достоверности выводится из известного анализа достоверности и обеспечивается даже в отсутствие сбоев. В общем

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

случае, измеритель с автоматической проверкой обеспечивает четыре основных параметра:

проверенное значение измерения (VMV), проверенная достоверность (VU), указание(статус MV)состояния ,в котором было произведено измерение, и состояние устройства. VMV это наилучшая оценка измерителя для значения измеренного параметра. VU и статус MV связаны с VMV. Измеритель создает отдельные VMV, VU и статус MV для каждого измерения. Состояние устройства указывает рабочее состояние измерителя. Измеритель также может обеспечивать другую информацию. Например, по запросу от системы управления, измеритель может обеспечивать детальную диагностическую информацию о состоянии измерителя. Кроме того, когда измерение превышает заранее определенный предел или близко к его превышению, измеритель может подавать сигнал тревоги на систему управления. Разные уровни тревоги можно использовать для указания степени, в которой измерение отклонилось от заранее определенного значения.

VMV и VU являются численными значениями. Например, VMV может быть измерением температуры, оцениваемым при 200°C, и VU, достоверность VMV, может составлять 9°. В этом случае, существует высокая вероятность (обычно 95%) того, что фактическая измеряемая температура оказывается в пределах огибающей VMV и определяется VU (т.е., от 191 до 209°C). Контроллер генерирует VMV на основании лежащих в основе данных от датчиков. Сначала контроллер выводит необработанное значение измерения (RMV), которое базируется на сигналах от датчиков. В общем случае, когда контроллер не обнаруживает аномалий, контроллер имеет номинальную достоверность в RMV и задает VMV равным RMV. Когда контроллер обнаруживает аномалию в датчике, контроллер не задает VMV равным RMV. В место этого, контроллер задает VMV равным значению, которое контроллер считает лучшей оценкой, чем RMV фактического параметра. Контроллер генерирует VU на основании не обработанного сигнала достоверности, который является результатом динамического анализа

									Лист
									31
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

недостовренности RMV. Контроллер осуществляет этот анализ недостатков в течение каждого периода дискретизации.

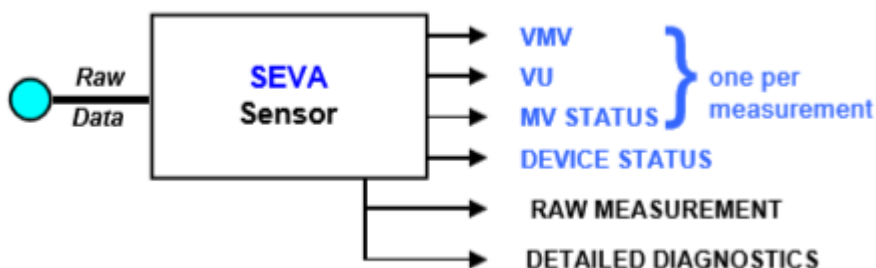


Рисунок 20 – SEVA сенсор

Для экспериментальной работы и практических демонстраций, предварительные инструменты SEVA являются обязательным условием. Такие прототипы обычно основаны на коммерческих инструментах. В первом поколении датчиков SEVA ПК был подключен к промышленному датчику для сбора сигналов, относящихся к измерениям и диагностике. Часто дополнительным требованием является передача управляющих сигналов от ПК к датчику, например, для активации схемы тестирования. Часто передатчик обходят целиком, и ПК подключается непосредственно к преобразователю. ПК действует как самопроверяющийся передатчик, выполняя обнаружение неисправностей, проверку, измерение и расчеты неопределенности. В результате компьютер и датчик вместе обеспечивают интерактивную демонстрацию поведения автономного передатчика SEVA. Хотя есть несколько преимуществ, полученных за счет использования прототипов над существующими промышленными инструментами (результаты более легко используются и воспринимаются пользователями более серьезно), недостатком является то, что доступ к желаемым сигналам не является легкодоступным, поскольку устройства не были разработаны с учетом такого положения.

Разработка специфического для сенсора интерфейса с ПК является интенсивной задачей, требующей, возможно, нескольких рабочих месяцев усилий

при регулярной связи с командой разработчиков сенсоров. Эта работа часто посвящена критическому анализу процесса проверки достоверности данных, потому что разработка (или подтверждение) диагностических методов зависит от наличия доступа к значимым сигналам, так что их поведение может наблюдаться в различных неисправных и исправных условиях.

По мере продолжения исследований необходимость в расширениях или модификациях аппаратного интерфейса может стать очевидной (например, введение дополнительных активных процедур тестирования или онлайн-процедур калибровки или контроль дополнительных сигналов). Поэтому желательно, чтобы аппаратные части и части формирования сигнала и, следовательно, их интерфейс с проверяющим микропроцессором демонстрировали высокую степень гибкости. В идеале аппаратное обеспечение должно быть максимально легко заменяемым программным обеспечением, работающим на процессоре, которое можно легко перекомпилировать и загрузить.

Основными требованиями к измерению являются расчеты частоты, амплитуды и разности фаз (здесь называемые ключевыми параметрами) между сигналами датчиков. Сопоставление с инженерными единицами также требует, чтобы температура трубы была компенсирована переменной жесткостью трубы. Таким образом, измерение массового расхода $m\dot{5}$ получается из зависимости / использования уравнения формы:

$$\dot{m} = (FC_1\Delta T + FC_2 + FC_3\Delta T^2) \frac{\tan(\phi)}{f}, \quad (8)$$

где FC - коэффициенты калибровки потока, ΔT - отклонение от температуры калибровки, ϕ - разность фаз и f - резонансная частота.

Обратите внимание, что в радианах ϕ близко к нулю (обычно не более 0,07), так что разница между ϕ и $\tan\phi$ очень маленький (менее 0,2%); нередко пренебрегают касательной функцией. Аналогично, измерение плотности ρ получают из резонансной частоты с использованием

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист 33
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

$$\rho = \frac{(DC_1 \Delta T + DC_2)}{f^2} + DC_3 + DC_4 \Delta T, \quad (9)$$

где DC - коэффициенты калибровки плотности, f^1 - отклонение от температуры калибровки, а f - резонансная частота. На данном этапе появляется мало возможностей для использования цифрового передатчика для улучшения преобразования в технические единицы. Как только ключевые параметры определены, остальные расчеты по сути являются обыденными и не рассматриваются в дальнейшем. Поскольку в этом документе дается общее представление обо всех аспектах цифрового измерителя Кориолиса, представлен только обзор основных расчетов. Подробное описание алгоритмов измерения и компенсации будет предметом будущей статьи. Предполагая, что необработанные данные отбираются с высокой скоростью и вычислительной мощности достаточно, существует множество способов извлечения ключевых параметров, и несколько стратегии были реализованы и сопоставлены. К ним относятся цифровые эквиваленты методов аналоговых передатчиков, таких как синхронная демодуляция (Bergovic et al., 1993) и временная задержка. Временная задержка, наиболее широко используемый метод, использует время между пересечениями нуля в сигналах датчика для измерения разности фаз. При заданных временах пересечения нуля t_A и t_B на датчиках А и В соответственно разность фаз / определяется как

$$\phi = (t_A - t_B)2\pi f. \quad (10)$$

Другие алгоритмы жизнеспособны только при цифровом воплощении, таком как методы Фурье или адаптивные наименьшие квадраты.

Подводя итог, можно сказать, что SEVA максимизирует доступность измерений, обеспечивая оперативную коррекцию неисправностей. Кроме того, он обеспечивает оценку качества измерений в стандартной общей форме, что позволяет принимать решения по эксплуатации и техническому обслуживанию на

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

основе критериев, специфичных для конкретного приложения, без подробного знания режимов неисправности датчика.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА

3.1 Математическая модель Кориолисова расходомера

Основным чувствительным элементом расходомера Кориолиса является измерительная трубка, которая транспортирует жидкость и поддерживает вибрацию на своей собственной частоте. Жидкость, которая течет в вибрирующей трубе, подвергается воздействию силы Кориолиса, величина которой пропорциональна произведению массового расхода жидкости и локальной угловой скорости вибрирующей трубы. Благодаря силе Кориолиса форма моды трубки становится антисимметричной, эффект, который используется в качестве основного принципа измерения. Эффекты установки - включая влияние пульсирующих и двухфазных потоков, влияние давления жидкости, температуры жидкости и внешних вибраций - на производительность расходомеров уже тщательно изучены, но было предпринято очень мало попыток определить влияние условий входного потока. Durst и Raszillier [1] изучили полностью развитое течение в трубе, вращающейся вокруг оси, перпендикулярной ее собственной. Существование вторичного потока, который происходит во вращающейся трубе, также предсказывается для вибрирующей измерительной трубы, где он может быть дополнительным источником антисимметрии в колебании трубы. Чизрайт, Кларк и Биссет [2] экспериментально исследовали эффекты вихревой и асимметрии профиля скорости во входном потоке. Возмущения потока были вызваны введением пластин частичной блокировки на входном фланце (асимметрия) и спирально скрученной полосой (завихритель) на входной золотниковой трубе. Испытания проводились для

три различных типа коммерческого расходомера, и не наблюдалось, или только небольшие изменения в калибровке расходомера. Хемп [3] применил теорию весовых векторов к простой конфигурации расходомера, состоящей из неподдерживаемой прямой трубки, не присоединенной к соседнему трубопроводу. Он показал, что чувствительность расходомера частично зависит от

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

взаимодействия профиля скорости с вибрацией жидкости вблизи концов трубки. Когда эти конечные эффекты принимаются во внимание, показания расходомера ниже, чем если бы конечные эффекты игнорировались. Из-за конечного эффекта увеличение чувствительности прогнозируется для турбулентного потока. В этой статье влияние профилей скорости на входе на рабочие характеристики расходомера Кориолиса с прямыми тонкими трубками было изучено с использованием коммерчески доступного кода Comet [4], который основан на методе конечных объемов. Были исследованы поля скорости и давления в трубе, а также величины и распределение сил жидкости, действующих на трубу. Крутящий момент, который вызывает дополнительное отклонение формы моды трубки, был рассчитан из распределения силы жидкости. Сравнение числовых значений (величины результирующей силы и крутящего момента) с данными, полученными с использованием одномерной модели, привело к предсказанию влияния профиля скорости на входе на чувствительность расходомера.

Мы использовали модель, основанную на теории пучка Эйлера и одномерном поле потока, чтобы оценить данные, полученные в результате численного моделирования. Если мы рассмотрим измерительную трубку с жесткостью на изгиб EI , массой на единицу длины M , и обозначим продольную ось трубки через x , время через t , боковое отклонение трубки через $w(x, t)$, массу жидкости на единицу длины по M_f и равномерной скорости жидкости в трубе по V уравнение движения выражается следующим образом:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -M_f V^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2M_f V \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} - M_f \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (11)$$

Влияние добавленных масс, внешних сил, демпфирования, давления и сил возбуждения не учитывалось.

Инерционные поступательные силы, соответственно, возникают в результате наличия потока жидкости в вибрирующей трубе. Форма первой моды $W_1(x)$ боковой вибрации измерительной трубки с фиксированными концами длины L при

									Лист
									37
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.	ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР				

отсутствии потока жидкости получается с левой стороны (1) и имеет следующую форму [5]

$$W_1(x) = C_1 F_1(x) = C_1 \left[\cosh\left(\lambda_1 \frac{x}{L}\right) - \cos\left(\lambda_1 \frac{x}{L}\right) - \frac{\cosh \lambda_1 - \cos \lambda_1}{\sinh \lambda_1 - \sin \lambda_1} \left(\sinh\left(\lambda_1 \frac{x}{L}\right) - \sin\left(\lambda_1 \frac{x}{L}\right) \right) \right], \quad (12)$$

где λ_1 - коэффициент, определяющий форму первой моды, а C_1 - коэффициент, определяющий амплитуду вибрации. В нашем случае $\lambda_1 = 4730$ и $C_1 = A / F_1(L/2)$, а A определяет амплитуду вибрации в середине трубки. Отклонение формы моды трубки не может быть получено с помощью численного моделирования; рассчитываются только давление и поле скоростей в измерительной трубе (область жидкости). Поэтому во время моделирования (представленного в следующем разделе) форма расчетной области жидкости изменяется в соответствии с формой первого режима измерительной трубки (13). Для заданной формы моды (13) эффект Кориолиса, который коррелируется с антисимметричным отклонением формы моды трубки, легче всего оценить по разнице между величинами результирующих сил Кориолиса на левой и правой половинах трубки ($R_{a,y}$):

$$R_{a,y} = -2M_f V \omega \left(\int_{L/2}^L \frac{dW_1}{dx} dx - \int_0^{L/2} \frac{dW_1}{dx} dx \right) = 4M_f V \omega d, \quad (13)$$

где ω – круговая частота трубки. Более точная оценка эффекта Кориолиса ожидается путем определения крутящего момента M_a вокруг середины трубы, поскольку значение момента содержит информацию, касающуюся распределения силы по длине трубы, а не только ее величину. Для определения величины крутящего момента должна быть принята во внимание только сила Кориолиса, поскольку она антисимметрична в среднем положении трубки:

$$M_a = 2 \cdot \left[-2M_f V \omega \int_0^{L/2} \frac{dW_1}{dx} \left(\frac{L}{2} - x \right) dx \right]$$

$$= 8 \frac{M_f V \omega C_1 L}{\lambda_1} \frac{\cosh \lambda_1 - \cos \lambda_1}{\sinh \lambda_1 - \sin \lambda_1}. \quad (14)$$

Основные уравнения, используемые для описания потока жидкости в комете, представлены в этом разделе. Модель представлена для изотермического и несжимаемого потока жидкости. Для жидкости с плотностью ρ , вектором скорости жидкости \mathbf{v} и поверхностной скоростью (конечного объема) v_s уравнения неразрывности и импульса имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho (\mathbf{v} - \mathbf{v}_s) \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (15)$$

где \mathbf{f}_b представляет вектор сил, действующих на объем жидкости, а \mathbf{T} - тензор деформации, который определяется как:

$$\mathbf{T} = 2\mu_e \dot{\mathbf{D}} - \frac{2}{3}\mu_e \text{div } \mathbf{v} \mathbf{I} - \left(p + \frac{2}{3}(\mu_e \text{div } \mathbf{v} + \rho k) \right) \mathbf{I}, \quad (16)$$

скорость тензора деформации, p - давление, \mathbf{I} - тензор единицы, а μ_e - эффективная вязкость жидкости, определяемая как сумма динамической μ и турбулентной вязкости μ_t :

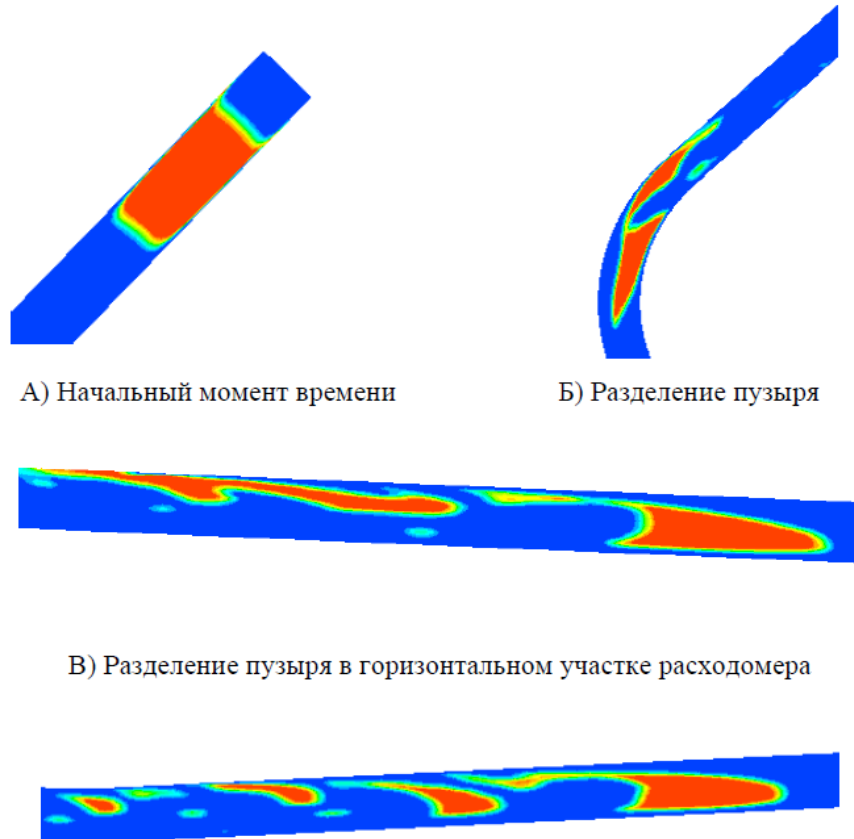
Силы жидкости, действующие на стенку трубы, рассчитываются из поля давления, которое является результатом численного моделирования. Как упоминалось в начале этого раздела, измерительная труба разделена в осевом и круговом направлениях. Таким образом, идея состоит в том, чтобы сначала суммировать силы, действующие на граничные элементы одного кольца (что является результатом осевой дискретизации трубки), а затем суммировать силы, действующие на кольца измерительной трубы. Сила, действующая на граничный элемент k в направлении оси y , может быть записана как сумма трения $T_{k,y}$ и сил давления $p_k s_{k,y}$, где $s_{k,y}$ - компонента y вектора поверхности граница k :

$$F_{k,y} = T_{k,y} + P_k S_{k,y} \quad (17)$$

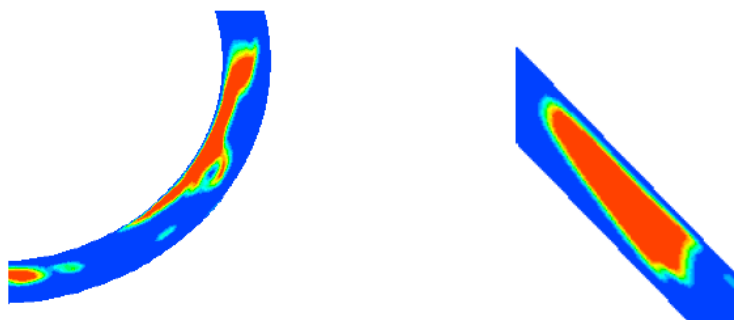
3.2 Моделирование газожидкостного потока.

В трубках Кориолисова расходомера при многофазном потоке измеряемая среда распределена не равномерно. Чтобы увидеть, как протекает измеряемая среда, было проведено моделирование, в котором можно имитировать различные потоки среды.

Имитация протекания двухфазной среды через расходомер была произведена с помощью программного пакета ANSYS Fluent, который является лидером в технологии моделирования многофазного течения. Применяв данный программный пакет, мы можем проследить разделение одиночного пузыря во время прохождения его через трубки расходомера. Далее приведена по кадровое состояние одиночного пузыря в определённый момент времени.



Г) Разделение пузыря в горизонтальном участке расходомера



Д) Слияние пузыря

Е) Конечный момент времени

Рисунок 21 – Покадровое движение одиночного пузыря.

где красный цвет – воздух, синий цвет – вода.

В течении всего прохода пузыря по измерительной трубке происходило несколько раз слияние и разделение пузыря. При прохождении первого изгиба произошло разделение пузыря на несколько частей. Такое состояние продолжалось до второго изгиба, после которого произошло слияние всех частей в единую форму.

Также было произведено моделирование потока при параметрах, в частности менялось количество воздуха в потоке и скорость потока. Ниже приведены рисунки протекания двухфазного потока после первого изгиба трубы расходомера.

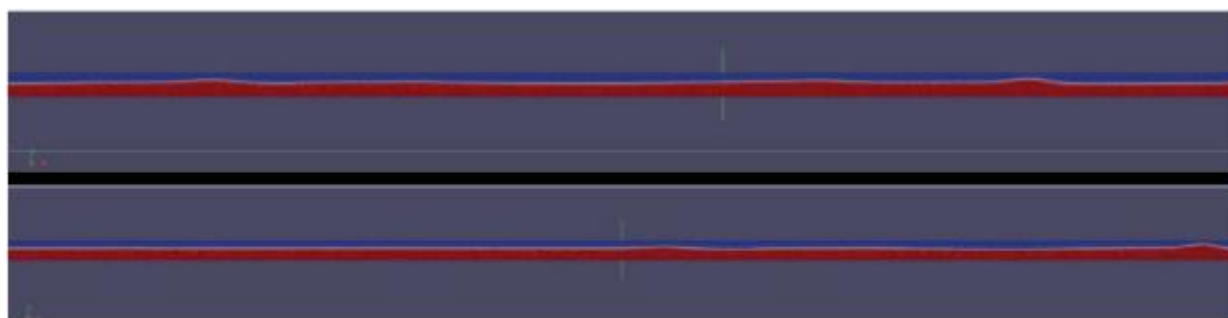


Рисунок 22 – Расслоенный режим течения

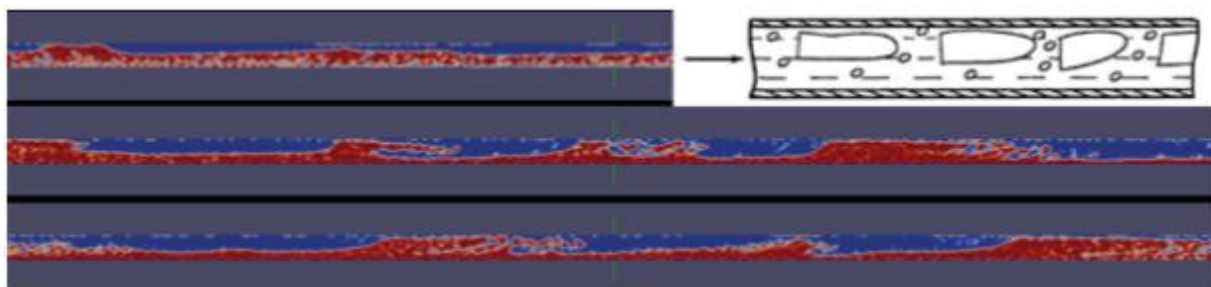


Рисунок 23 – Пробковый (снарядный) режим течения

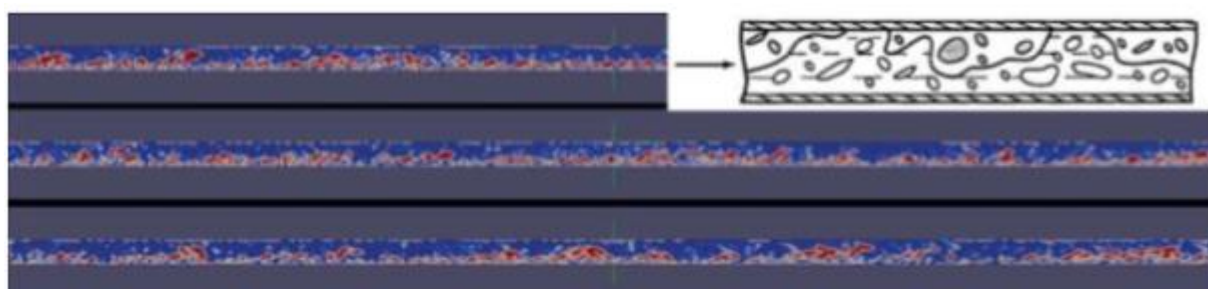


Рисунок 24 – Эмульсионный режим течения

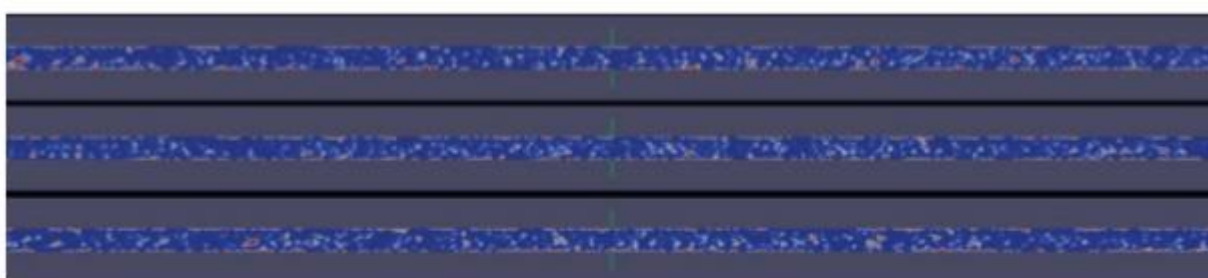


Рисунок 25 – Кольцевой режим течения

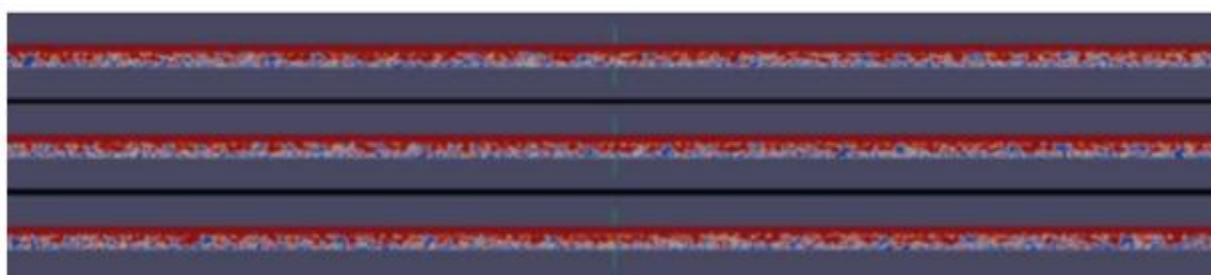


Рисунок 26 – Пузырьковый режим течения

Для горизонтальных труб характерными являются пузырьковая, снарядная, эмульсионная и дисперсно-кольцевая структура. Малому расходу газа при высокой скорости потока соответствует пузырьковая структура. В данном случае несущей фазой является доминирующая по объему жидкость, а газ представлен

пузырьками, размеры которых намного меньше диаметра трубы.

При более низкой скорости потока, если объемная концентрация газовой фазы достаточно велика и имеются соответствующие условия вверх по потоку (длина предшествующего участка течения, технология ввода или образования газовой фазы), то пузырьки, сливаясь, занимают большую часть сечения трубы и устанавливается снарядная структура течения

Увеличение расхода газа обуславливает рост скоростей снаряда и перемычки. Отмечено, что при высоких скоростях нарушается упорядоченная структура снарядного течения и наблюдается эмульсионная структура, иногда называемая также пенной. Эмульсионная структура отличается крайней неупорядоченностью. При высоких скоростях пузырьковое течение может сразу перейти в эмульсионное, минуя стадию снарядной структуры.

Увеличение расхода газа при высокой скорости потока, а, следовательно, и газосодержания приводит к слиянию газовых фракций. При этом вблизи стенок трубы формируется пленка жидкости, поэтому соответствующая структура называется пленочной. Данный термин является общим для каналов любой геометрии. Применительно к трубам круглого сечения обычно используется термин «дисперсно-кольцевая структура». Кроме жидкой пленки, структура этого течения содержит дисперсное ядро, в котором в качестве несущей фазы выступает газ, а жидкость содержится в виде мелких капель. При отсутствии в ядре капель используется термин «кольцевая структура».

В пузырьковой, снарядной, эмульсионной и дисперсно-кольцевой структурах в горизонтальных каналах возможна существенная неравномерность распределения фаз по сечению, связанная с действием гравитации. При значительных объемных концентрациях газовой фазы и малых скоростях в потоке динамическое воздействие газа на жидкость недостаточно велико для формирования пленки - жидкость концентрируется в нижней части трубы. Такая структура называется расслоенной.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

3.3 Модель сигналов с сенсоров кориолисового расходомера для двухфазной среды

На рисунке 26 приведены сигналы с сенсоров кориолисова расходомера в случае однофазной среды. Амплитуда и частота сигналов постоянны, поэтому обработка сигналов расходомеров в однофазной среде не представляет особой сложности.

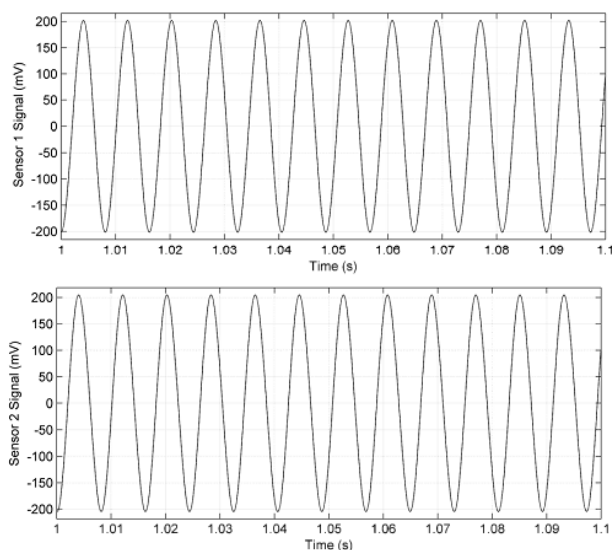


Рисунок 27 – Сигналы с сенсоров кориолисова расходомера (однофазная среда)

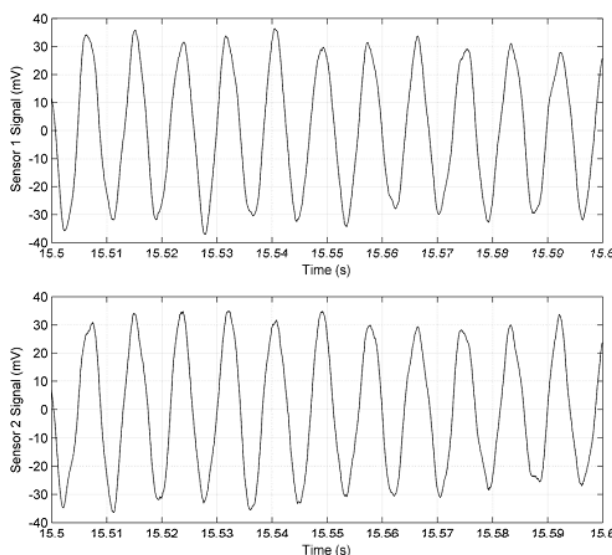


Рисунок 28 – Сигналы с сенсоров (двухфазная среда)

На рисунке 27 приведены сигналы для случая двухфазной среды (жидкость/газ). Как можно видеть, для данного случая характерны быстрые изменения частоты и амплитуды колебаний.

Для обеспечения адекватной работы кориолисова расходомера в двухфазной среде необходимы методы обработки сигналов, способные отслеживать быстрые изменения частоты, амплитуды и разности фаз. Некоторые из этих методов описываются далее.

Для тестирования методов обработки сигналов обычно используется модель сигнала со случайно меняющейся амплитудой, частотой и разностью фаз. Приведем модель из статьи [26]:

$$\begin{cases} y_1(n) = A(n) \sin \left[\frac{2\pi f(n)}{f_s} + \frac{\varphi(n)}{2} \right] + \sigma_{e1} \cdot e_1(n), \\ y_2(n) = A(n) \sin \left[\frac{2\pi f(n)}{f_s} - \frac{\varphi(n)}{2} \right] + \sigma_{e2} \cdot e_2(n), \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} A(n) = A(n-1) + \sigma_A \cdot e_A(n), \\ f(n) = f(n-1) + \sigma_f \cdot e_f(n), \\ \varphi(n) = \varphi(n-1) + \sigma_\varphi \cdot e_\varphi(n). \end{cases}$$

Здесь $y_1(n)$, $y_2(n)$ – модельные сигналы с сенсоров расходомера, имеющие одинаковые, но зависящие от времени параметры: амплитуду $A(n)$, частоту $f(n)$ и разность фаз $\varphi(n)$.

Частота дискретизации обозначена за f_s . Для некоррелированного белого шума введены обозначения $e_1(n)$, $e_2(n)$, $e_A(n)$, $e_f(n)$, $e_\varphi(n)$.

В статье [34] приняты следующие значения переменных: $f_s = 2$ кГц, $\sigma_{e1} = \sigma_{e2} = 10^{-4}$, $\sigma_A = 10^{-3}$, $\sigma_f = \sigma_\varphi = 10^{-4}$. Начальные значения амплитуды, частоты и фазы: $A(0) = 0.06$ В, $f(0) = 90$ Гц, $\varphi(0) = 2^\circ$.

На рисунке 3.7 приведен пример модельных сигналов с указанными параметрами.

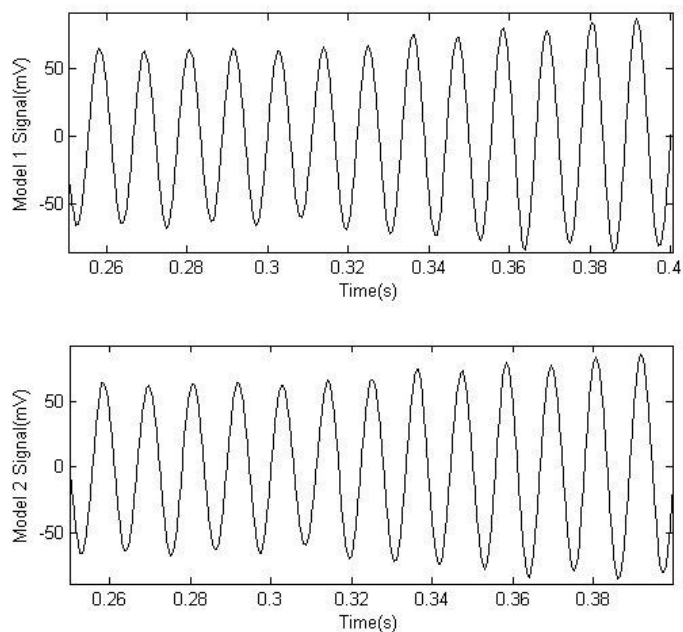


Рисунок 29 – Модель сигнала с сенсоров расходомера

Графики изменения параметров сигналов приведены на рисунке 29.

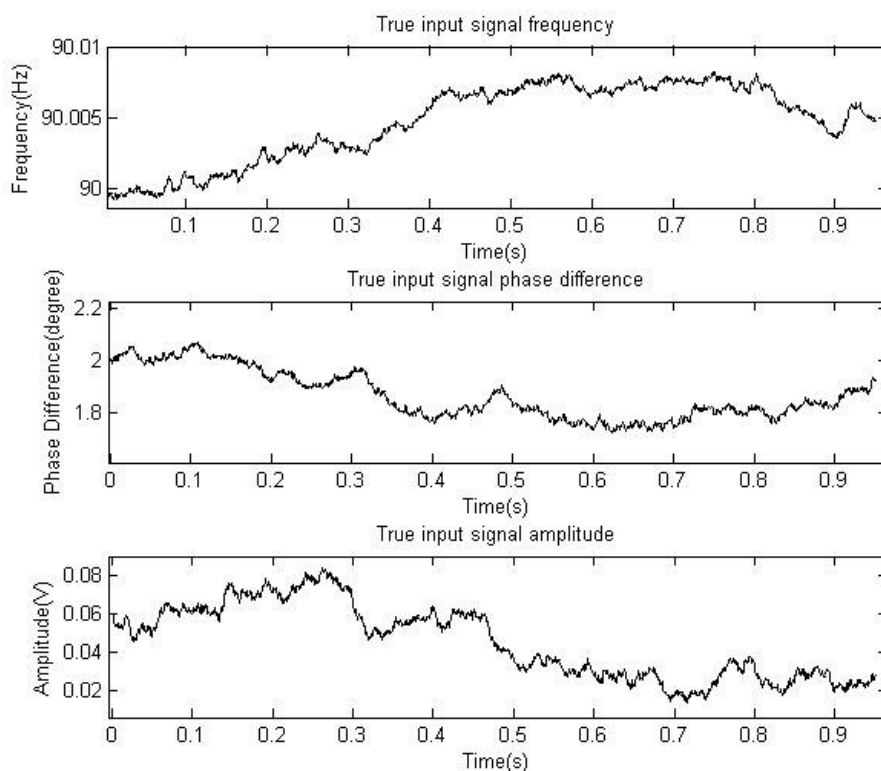


Рисунок 30 – Изменение параметров сигналов

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

Как можно видеть, модель хорошо отражает быстрые изменения параметров сигналов, характерные для работы расходомера в двухфазной среде.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
						47
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

4.1 Метод самодиагностики SEVA датчиков

Работа расходомерной трубки поддерживается во время всплесков двухфазного потока, ошибки в измерении массового расхода и плотности вызваны физикой пузырьков, движущихся через вибрирующую трубку. Тем не менее, простые теоретические модели дают только приближение ошибки, которые наблюдаются на практике. Например, рис. На фиг.6 показаны типичные ошибки массового расхода и плотности, наблюдаемые для разных скоростей потока и доли пустот газа (то есть процентное содержание газа по объему). Хотя величина ошибок может быть высокой, они повторяемы. Методы нейронной сети [9] были использованы для успешного исправления этих ошибок на основе внутренних наблюдаемых параметров. На рис. 7 показаны ошибки остаточной плотности и массового расхода, когда коррекция применяется в режиме онлайн. Эти результаты показывают самые последние алгоритмы коррекции, используя аналогичные методы и экспериментальные процедуры, как описано в [9]. Ошибки плотности в основном сохраняются в пределах 1%, а ошибки массового расхода - в основном в пределах 2%. Однако двухфазное течение представляет собой сложное явление со многими параметрами, включая режим потока, вязкость и давление. Текущий алгоритм коррекции наиболее эффективен для процессов, которые имеют физические свойства, аналогичные смеси воды и воздуха. Успешные промышленные применения включают этиленоксид, традиционно сложную жидкость для измерения [8]. Дальнейшие двухфазные алгоритмы коррекции потока находятся в стадии разработки. Текущее исследование исследует жидкости с более высокой вязкостью и трехфазные потоки для нефтегазовых применений

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

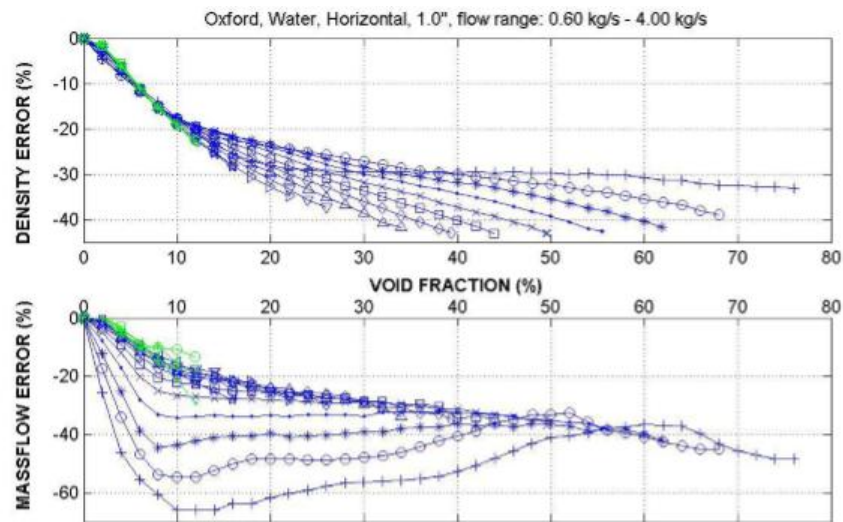


Рисунок 31 – Ошибка значения массового расхода

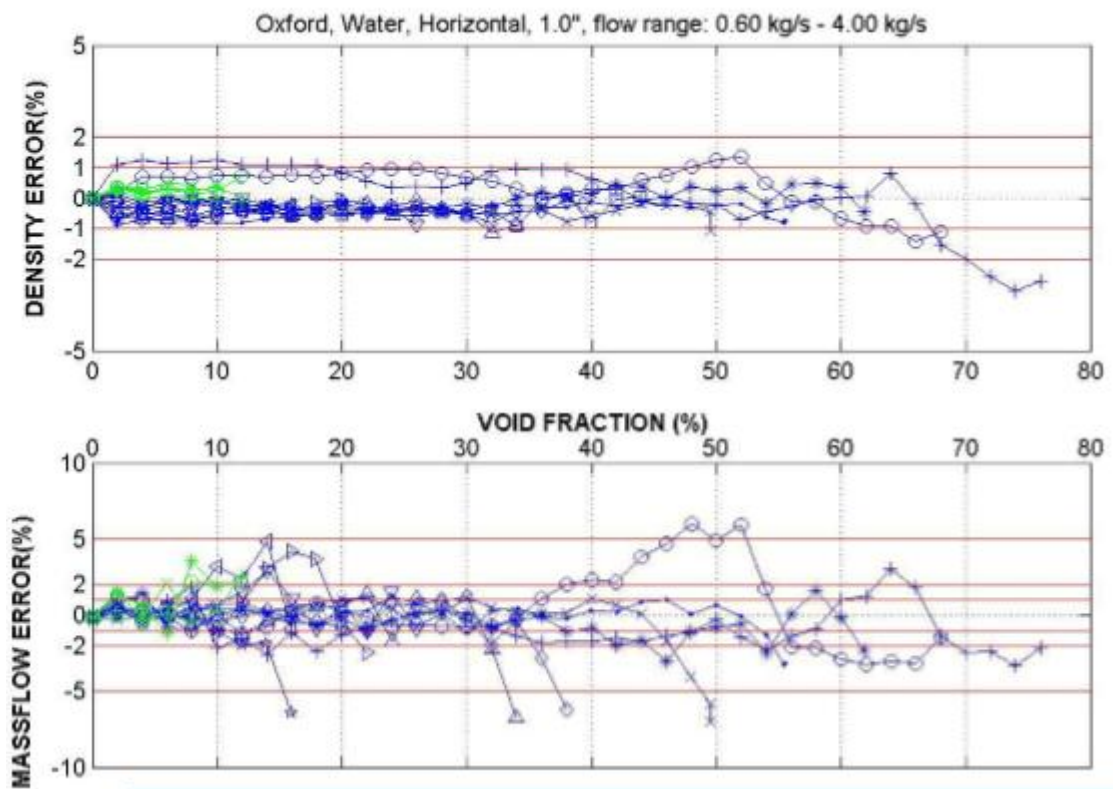


Рисунок 32 – Исправленный массовый расход и плотность в двухфазном потоке

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.

Цифровой передатчик был сконструирован для поддержания колебания в присутствии двухфазной подачи. В экспериментальных испытаниях не было возможности остановить проточную трубу любого размера с любым уровнем газовой фазы при управлении цифровым передатчиком. В отличие от этого, аналоговый передатчик останавливается с газовой фазой около 2%. Более современные коммерческие конструкции более устойчивы к двухфазному потоку, выдерживая до 40% газовой фазы. Однако даже там, где поддерживается вибрация, генерируются большие ошибки массового потока. Недавно завершённый исследовательский проект в Оксфорде изучил возможность обнаружения и коррекции двухфазного потока [8]. Разработана нейросетевая модель для прогнозирования погрешности массового расхода по нескольким внутренним параметрам. На приведенном ниже рисунке показана нескорректированная погрешность массового расхода по отношению к расходу и газовой фазе (о чем свидетельствует падение плотности наблюдаемой смеси) для конкретной конструкции проточной трубы. Здесь, 25mm flowtube было в горизонтальном выравнивании, и было подано с смесями воды/воздуха существенно ограниченными к непрерывной пузырьчатой подаче. Приведенные ниже результаты были получены в ходе 134 экспериментов.

На приведенном выше графике показаны результаты, полученные в дальнейших экспериментах в том же диапазоне параметров, в ходе которых применяется алгоритм коррекции. Во всех случаях погрешности массового расхода сохраняются в пределах 2%.

На соседнем графике показано, как устройство SEVA реагирует на начало двухфазного потока в режиме реального времени. С подачей одиночной фазы (до $t=8s$), измерение масс-подачи ясно и оно имеет малую неопределенность около 0,2% из чтения. Как только начинается двухфазный поток, применяется алгоритм коррекции, измерение устанавливается в размытое состояние, а неопределенность существенно возрастает, что отражает снижение точности скорректированного измерения. Нижняя линия показывает нескорректированный массовый расход

						<i>Лист</i>
					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	50
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат.</i>		

потока пока пунктирная линия показывает (одиночную фазу-жидкость) расход потока как измерено независимо другим метром Кориолиса до пункта впрыски воздуха.

В реальном применении, потребитель имел бы вариант продолжать деятельность с уменьшенным качеством исправленного массового расхода потока, переключать к альтернативному измерению, или выключать процесс. В тех случаях, когда аэрация происходит спорадически, общая неопределенность партии будет зависеть как от продолжительности, так и от тяжести периодов двухфазного потока.

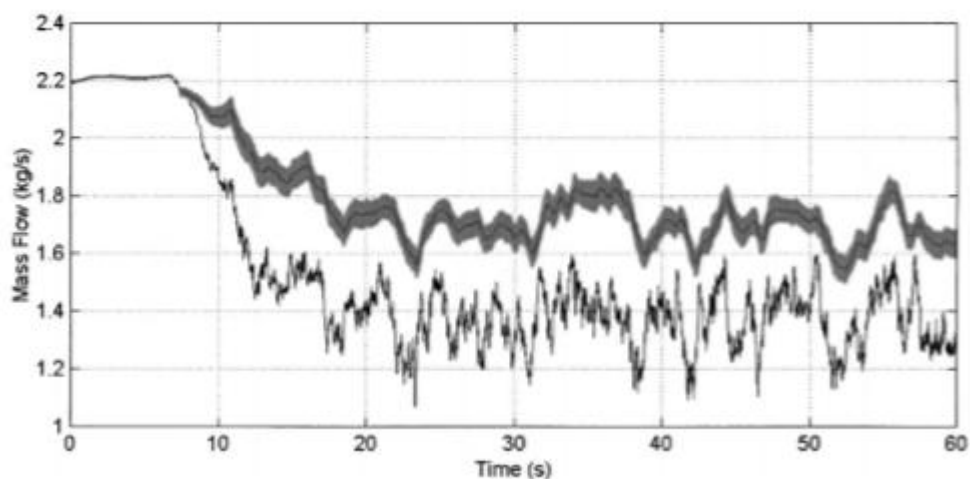


Рисунок 33 – Массовый расход при начальном переменном значении воздуха

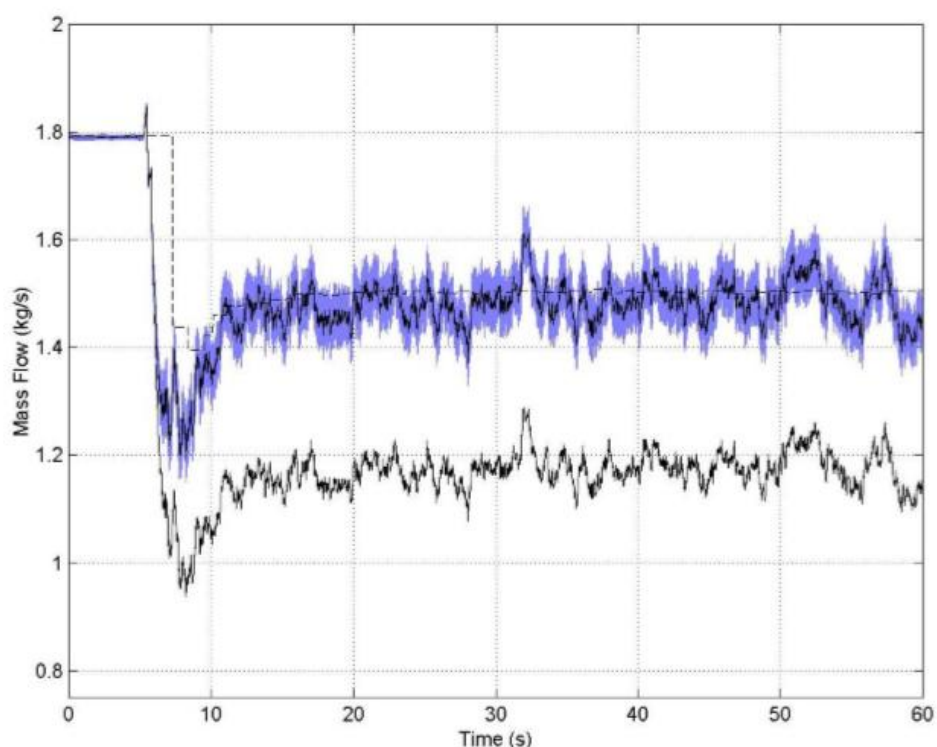


Рисунок 34 – Массовый расход при постоянном значении воздуха

В идеале каждый датчик должен обеспечивать полное диагностическое покрытие. Однако экономически или технически невозможно гарантировать, что все возможные режимы неисправностей могут быть обнаружены внутри самого датчика. Это особенно актуально для микро- и нанодатчиков с ограниченными вычислительными и диагностическими ресурсами. Метрики SEVA можно использовать для проверки согласованности на более высоком уровне между избыточными датчиками SEVA, чтобы обнаружить неисправности, которые не могут быть диагностированы в самих отдельных датчиках [11]. Рисунок 3 иллюстрирует сценарий. Три идентичных датчика SEVA (например, избыточные микродатчики на одном кристалле), контролирующие одну и ту же измеряемую величину процесса, генерируют показатели SEVA на основе ограниченной диагностики, доступной в каждом. Комбинированный блок использует данные SEVA от каждого датчика для проверки согласованности между ними, обработки любых обнаруженных выбросов и создания комбинированной наилучшей оценки

(СВЕ) истинного значения измерения, а также показателей SEVA, связанных с этой оценкой.

Есть много методов, которые можно использовать для объединения данных от нескольких датчиков. В [11] представлен простой алгоритм, не требующий моделирования процессов и подходящий для реализации в стандартном блоке, который может использоваться в системе управления. Все, что используется, это свойства метрологической неопределенности. Таким образом, учитывая n оценок x_i одной и той же измеряемой величины с неопределенностью u_i и предполагая, что все измерения оцениваются как непротиворечивые, объединенная наилучшая оценка измерения x^* определяется как:

$$x^* = \sum_{i=1}^n w_i x_i \text{ where } w_i = \frac{\left(\frac{1}{u_i}\right)^2}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{u_j}\right)^2} \quad (19)$$

в то время как неопределенность x^* определяется:

$$u^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2 u_i^2} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_i}\right)^2}} \quad (20)$$

Однако перед объединением измерений необходимо выполнить проверку согласованности. Моффат [12] предлагает расчет только для двух измерений. Это основано на нулевой гипотезе, что разница между двумя измерениями x_1 и x_2 должна иметь нулевое среднее значение. Таким образом, x_1 и x_2 согласованы по Моффату, если:

$$\left| \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}} \right| < 1 \quad (21)$$

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						53
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

Чтобы определить, какой датчик неисправен, обычно используется как минимум три в мажоритарной системе голосования. Предполагая, что неисправности редки, предполагается, что если один датчик несовместим с большинством, то он может быть неисправен. К сожалению, при расширении проверки согласованности за пределы двух датчиков тест Моффата не является транзитивным: если x_1 соответствует x_2 , а x_2 соответствует x_3 , из этого не следует, что x_1 должен соответствовать x_3 . Таким образом, учитывая набор из 3 или более независимых измерений, которые необходимо объединить, необходимо решить две проблемы. Во-первых, должно быть найдено максимальное подмножество взаимосогласованных измерений и объявлено непротиворечивое подмножество. Во-вторых, измерения за пределами этого подмножества должны быть рассмотрены. Можно показать, что задача нахождения максимального подмножества взаимосогласованных измерений эквивалентна проблеме максимального клика в теории графов. В [11] описан линейный алгоритм, обеспечивающий аппроксимацию максимальной клики, а также методы плавного уменьшения влияния противоречивых измерений на величину и неопределенность СВЕ.

4.2 Метод демпфирования

Трудно получить в конечном виде аналитическое решение (1). Тем не менее, оно может быть решено численно с использованием метода конечных элементов для любой формы измерительных трубок расходомера Кориолиса [15,19]. С помощью метода конечных элементов, отдельных элементарных матриц (масса, демпфирование и жесткости) могут быть собраны в глобальных матриц, **M**, **C** и **K**, где регулирующее уравнение (1) может принять простую форму матрицы:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (21)$$

Существуют специальные решатели, доступные в коммерческих конечно элементных пакетах, с помощью которых можно получить собственные значения и собственные векторы. Этот метод использован в работах [15,19] и может дать

									Лист
									54
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.					

полезную информацию для практического использования, например для определения временной задержки или разности фаз между двумя датчиками движения, вызванных массовым потоком. Однако, как отмечено в [20], это решение теряет значительную часть интуитивного понимания технической проблемы по сравнению с известной обработкой недемпфированному случаю с помощью обычных способов. Таким образом, линейная модель демпфирования Релеем, как описано подробно [20] здесь используется. Эта модель предполагает небольшое демпфирование так, чтобы затухающие собственные частоты и сложные формы мод могут быть получены с использованием незатухающих собственных частот и форм колебаний. Подробный вывод можно найти в [20] в соответствии с оригинальной работой Рэлея, а затухающие собственные частоты приведены в качестве

$$\bar{\omega}_d \approx \pm \omega_d + \frac{iC'_{dd}}{2} \quad (22)$$

и комплексные формы колебаний $\bar{\mathbf{u}}^{(d)}$ приведены как

$$\bar{\mathbf{u}}^{(d)} \approx \mathbf{u}^{(d)} \pm i \sum_{c \neq d} \frac{\omega_d C'_{cd} \mathbf{u}^{(c)}}{\omega_c^2 - \omega_d^2} \quad (23)$$

где ($d = 1, \dots, N$) число рабочих мод и ($c = 1, \dots, N$) число других мод, вносящие вклад в мнимую часть; N общее число мод; $\mathbf{u}^{(d)}$, и $\mathbf{u}^{(c)}$ представляют собой незатухающие формы колебаний, нормированные массовой матрицей ω_d и ω_c являются незатухающими (угловые) собственные частоты; а также

$$C'_{cd} = \mathbf{u}^{(c)t} \mathbf{C} \mathbf{u}^{(d)}. \quad (24)$$

В расходомере Кориолиса измерительные трубки приводятся в движение на одной из своих собственных частот, обычно это первая основная частота, которую можно назвать рабочей частотой (drive frequency). Поскольку, чтобы найти эту частоту обычно используется контур управления фазовой синхронизации, это на самом деле незатухающая собственная частота ω_d . Когда жидкость проходит через измерительную трубу, сила Кориолиса создается за счет скорости жидкости и

углового движения трубки. Эти силы противоположны друг другу на впускной и выпускной сторонах. Этот эффект может быть обнаружен с помощью двух симметрично расположенных датчиков измеряющих разности фаз ϕ_d двух синусоидальных сигналов. Тем не менее, это на самом деле временная задержка $t_d = \phi_d / \omega_d$ между двумя этими сигналами, которая обеспечивает прямое измерение массового расхода, так как \dot{m} массовый расход почти идеально линейен в пропорции к временной задержке.

Теоретически, термин Кориолиса в $2\rho_f A_f v_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}$ (1) вносит вклад в недиагональные члены матрицы демпфирования конечных элементов. Так как основная задача измерения разности фаз потока, другие демпфирующие компоненты могут быть проигнорированы. Поэтому уравнение (3) становится

$$\bar{\omega}_d \approx \pm \omega_d \quad (25)$$

Кроме того, поскольку генерируемый сигнал разности фаз, как правило, достаточно мал, в величине нескольких микро радиан, разность фаз может быть представлена как

$$\phi_d \approx 2 \sum_{c \neq d} C'_{cd} \cdot \frac{u_s^{(c)}}{u_s^{(d)}} \cdot \frac{\omega_d}{\omega_c^2 - \omega_d^2} \quad (26)$$

где u_s является затухающей формой моды в положении датчика движения. Соответственно, время задержки может быть задано как

$$t_d \approx 2 \sum_{c \neq d} C'_{cd} \cdot \frac{u_s^{(c)}}{u_s^{(d)}} \cdot \frac{1}{\omega_c^2 - \omega_d^2} \quad (27)$$

Для применения модели линейного демпфирования (LDM) к расходомеру Кориолиса процедура (1) определить геометрию трубы и вычислить отдельные матрицы элементов; (2) собрать глобальные матрицы; (3) получить незатухающие собственные частоты и формы колебаний с использованием матриц массы и жесткости; (4) вычислить сигнал генерируемый временной задержки для каждой отдельной моды ($c = 1, \dots, N \quad c \neq d$) в рабочей моде d с использованием

демпфирующий матрицы и незатухающие собственные частоты и формы колебаний по формулам (5) и (8); (5) получить полную временную задержку путем суммирования вклада каждой моды. Следует отметить, что линейное демпфирование термин, указывающий на демпфирующую матрицу, созданную из силы Кориолиса, которая содержит только недиагональные компоненты, в то время как материал демпфирования игнорируется.

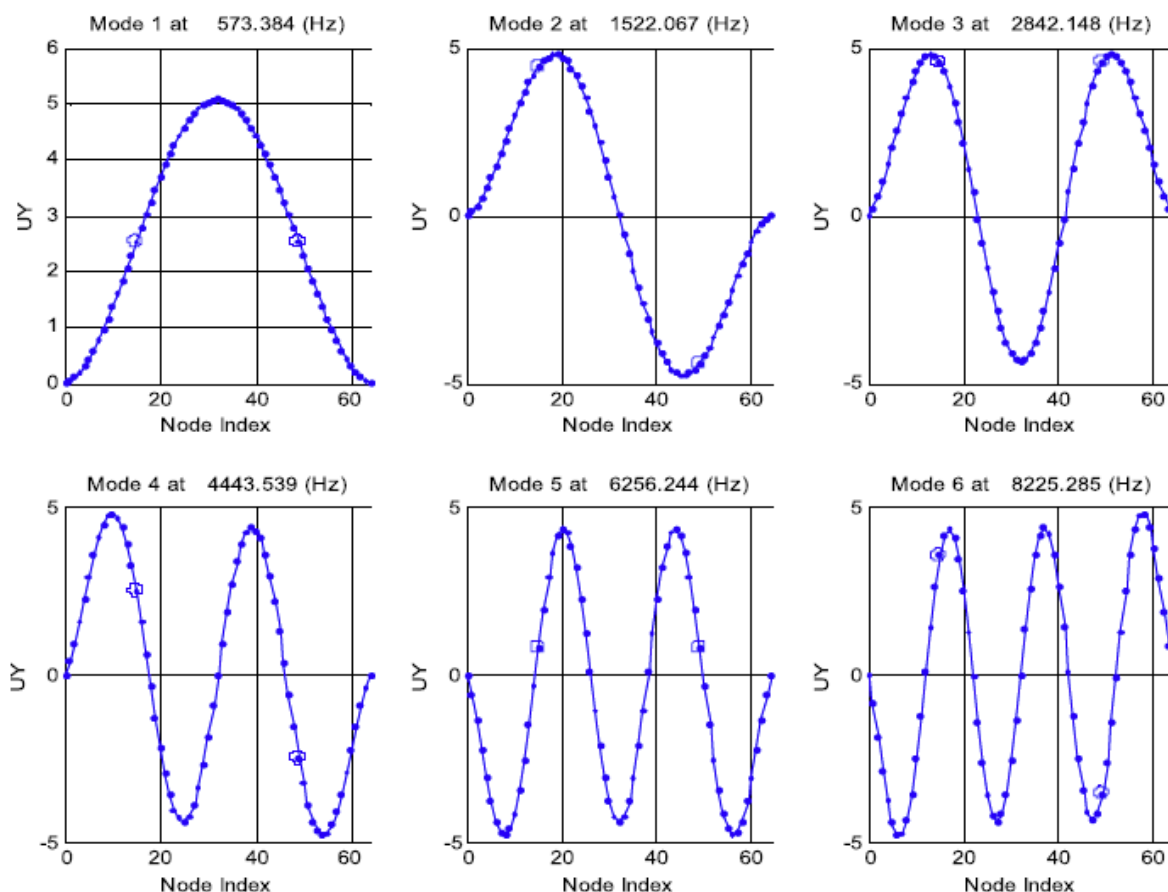


Рисунок 34 – Незатухающие собственные частоты и формы колебаний для первых 6 мод под давлением 100 бар

В первых двух шагах для создания геометрии и матриц конечных элементов, общие конечные пакеты элементов могут быть использованы для моделирования практически любой формы и конфигурации датчиков потока Кориолиса. Это на самом деле один из самых важных намерений предложить такую процедуру LDM. Тем не менее, эта процедура LDM явно отличается от прямого затухающего

известно, что изогнуты трубы могут испытывать эффект Бурдона под давлением, где изгиб стремящейся выпрямить вверх под действием внутреннего давления, что создает дополнительные напряжения. Подготовительные работы авторами было сделано, и указывает на то, что напряжения в трубе, вызванной давлением и движения в поперечном сечении (т.е. вне предположения луча) может также объяснить несоответствие. Это, как представляется, в соответствии с направлением указал [3] при использовании "устойчивые эффекты стресса", чтобы объяснить разницу между так называемый "традиционная нерастяжимая теория" и "расширяемой теорией". Более подробная работа по изогнутой трубки Кориолиса планируется и может быть представлены в будущем.

Как обсуждалось выше, большинство современных расходомеров Кориолиса имеют относительно малую чувствительность к изменению давления. Для того, чтобы точно оценить их чувствительность к изменениям давления, измерен расход экспериментальное при различных давлениях. Испытания под низким давлением может потребовать очень стабильный расход и точный буровой установки потока с малыми неопределенностями, в то время как испытания высокого давления может положить больше делает акцент на строительство буровой установки потока, в частности, ссылки массового расхода.

Для того, чтобы уменьшить чувствительность давления Кориолиса, можно сделать коррекцию в режиме реального времени к исходному измерения с использованием дополнительного давления на входе. Тем не менее значительное улучшение чувствительности давления между двумя поколениями Кориолиса [2] указывает на то, что наилучшим решением является, вероятно, разработать расходомерам с оптимизированной конфигурации (формы трубки потока, измерение, выбор материалов и т.д.), который может быть по своей природе нечувствительны на изменения давления. Дальнейшее разработана теоретическая модель может быть очень полезным для достижения такого давления нечувствительные расходомер.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник/П. П. Кремлевский. – 5-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2002.Кн.2. – 412 с.
2. Gregel, J.A. : "Moglichkeiten und Grenzen der CorioKs" Massendurchflu&rne&technik"/A.J.Gregel, Erlangen, 2001.
3. Manus Henry: "Self"validating digital Coriolis mass flow meter" (Массовый цифровой кориолисов расходомер с функцией самопроверки), Computing and Control Engineering journal, October 2000.
4. Grumski, J.T.: "Performance of a Coriolis" Type Mass Flow Meter in the Measurement of Two"Phase (Air" Liquid) Mixtures" (Рабочие характеристики и кориолисовых массовых расходомеров при измерениях для двухфазных смесей воздух/жидкость)/Т.Т. Grumski. Proceedings of the 1984 ASME Winter Meeting: Mass Flow Measurement.
5. Нерп, F.J: "Coriolis meters in 2 phase conditions" (Кориолисовы расходомеры в случае двух фаз)/J.Нерп, Н.Yeung, IEE computing and control Engineering journal, August/September 2003.
6. Нерп, F.J: "On the Theory and Performance of Coriolis mass flowmeters" (О теоретических аспектах и рабочих характеристиках кориолисовых массовых расходомеров) Proceedings of the International Conference on Mass Flow Measurement Direct and In direct; IBC Technical Services, London, February 1389
7. Hussain, Y.H: "Single straight tube mass flowmeter using "Adaptive Sensor Technology AST" (Массовый расходомер с одной прямой трубой на базе технологии "адаптивных датчиков" AST)/ Y.H.Hussain , VDI Berichte, Nr. 1829, 2004.
8. Amadi-Echendu, J.E. Analysis of signals from vortex flowmeters / J. E. Amadi-Echendu, H. Zhu, E. H. Higham // Flow Meas. Instrum., 1993. Vol. 4 No 4, pp. 225-231.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						62
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

9. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бен-дат, А. Пирсол. М.: Мир, 1989. – 540 с.

10. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

11.ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

12. МИ 2021-89 ГСИ. Метрологическое обеспечение гибких производственных систем. Основные положения. М., 1991.

13. МИ 1951-88. Динамические измерения. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов 1990. – 10 с.

14. Сажин, С.Г. Методы диагностики информационно-измерительных каналов АСУТП. Идентификационный подход / С.Г. Сажин, В.П. Луконин, С.В. Токарев, Н.А. Бахметова // Контроль. Диагностика. - 2007. - №9.

15. Васильев, В.А. Принципы построения моделей измерительных приборов и систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – №6. – с. 40-45.

16. Воронин, В.В. Множество возможных дефектов и виды технических состояний // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №6. – с. 41-44.

17. Каюков, И.В. Сравнительный анализ различных методов оценки частоты сигнала / И.В. Каюков, В.Б. Манелис // Радиоэлектроника. – 2006. – №7.

18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

19. Алексеев, К.А. Вейвлет-ряды в задаче оценивания собственных частот датчиков // Датчики и системы. – 2001. – №12

20. Рудакова, И.В. Использование метода главных компонент в алгоритмах обнаружения нарушений в ходе технологических процессов / И.В. Рудакова, Л.А. Русинов, О.А. Ремизова // Информационные технологии. - 2006. - №11.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		

21. Горохов, Л.П., Сапожникова, К.В., Тайманов, Р.Е. Способ контроля метрологической исправности измерительного преобразователя неэлектрической величины и устройство для его осуществления / Л.П. Горохов, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов, 2007.

22. Семенов, А.С., Метод самодиагностики первичных преобразователей использующий нелинейные свойства функции преобразования / А.С. Семенов, А.Л. Шестаков // Метрология и метрологическое обеспечение: сборник докладов XXIII национального научного симпозиума с международным участием, 9 – 13 сентября. – София: Софттрейд, 2013. – 165-170 с.

23. Филиппов, Л.И. Принципы аналитического представления и дискретизации сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – №10.

24. Исмибейли, Р.Э. Моделирование магнитных элементов и устройств методом конечных элементов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – №4. – с. 21-27.

25. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. –СПб, Питер, 2002. – 108 с.

					ЮУрГУ – 12.03.01. 2019. 329 ПЗ ВКР	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат.		