

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
_____ А.Л. Шестаков
_____ 2020 г.

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ–12.03.01.2020.299. ВКР

Руководитель проекта,
доцент кафедры ИнИТ
_____ / О.Ю. Бушуев
_____ / 2020 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-414
_____ / М.А. Моторина
_____ / 2020 г.

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

АННОТАЦИЯ

Моторина М.А. Диагностика технического состояния датчика давления. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-414; 2020, 81 с., 37 ил., библиогр. список – 30 наим., 2 прил.

В рамках выпускной квалификационной работы рассмотрены уже имеющиеся методы диагностики технического состояния датчиков давления, выявлено, что они не позволяют в полной мере дать однозначный вывод о наличии неисправности в датчиках давления с различными принципами действия.

Данная работа направлена на увеличение информации о возможных признаках неисправностей, возникающих в преобразователях давления тензометрического типа, на основе выходного сигнала с датчиков.

Цель данной работы: выявить признаки неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации датчика давления, а также разработать рекомендации по реализации алгоритмов диагностики технического состояния преобразователя давления.

Для достижения цели выпускной квалификационной работы были выполнены следующие **задачи**:

- проведен аналитический обзор существующих методов диагностики технического состояния датчиков давления;
- определены по сигналу с датчиков параметры, которые могут нести в себе информацию о неисправности;
- разработана модель измерительного преобразователя давления;
- сформированы практические рекомендации по выявленным закономерностям.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Моторина М.А.			<i>Диагностика технического состояния датчика давления</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проз.</i>		Бушуев О.Ю.					3	81
<i>Н.контр.</i>		Лысова А.А.				ЮУрГУ		
<i>Утв.</i>		Лапин А.П.				Кафедра ИНИТ		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	7
1.1. Анализ технического задания	7
1.2. Принцип работы тензометрических датчиков давления	7
1.3. Сравнительный анализ известных методов диагностики состояния преобразователей давления	10
1.4. Описание видов отказов преобразователей давления.....	14
2 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....	22
2.1. Сбор данных.....	22
2.2. Подготовка данных	23
2.2.1. Выявление тренда	23
2.2.2. Проверка на нормальность закона распределения.....	28
2.3. Оценивание основных свойств.....	30
2.3.1. Результаты расчета характеристик сигнала исправных датчиков.....	36
2.3.2. Результаты расчета характеристик сигнала неисправных датчиков.....	38
2.4. Сравнение статистических оценок	41
2.5. Сравнение оценок спектра выходных сигналов	44
3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	51
3.1. Обзор методов построения моделей.....	51
3.2. Моделирование исправного состояния	54
3.3. Моделирование неисправного состояния	59
4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	65
4.1. Рекомендации по алгоритму диагностики	65
4.2. Проект программы испытаний датчиков для продолжения исследований	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	77
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Программные коды в среде MATLAB	80
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Форма протокола о проведении испытания	81

									Лист
									4
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат					

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важную роль в технике играют датчики для измерения значений физических параметров и преобразования их в электрические сигналы. В частности, такими измерительными преобразователями являются датчики давления.

В любом производственном процессе, где датчики давления играют решающую роль, существует необходимость в специальном обследовании, чтобы убедиться, что они безопасны и измеряют правильно.

Исходя из рекомендаций по техническому обслуживанию известно, что большинство отказов таких датчиков легко обнаруживается, но есть другие аномалии, такие как образование пузырьков в импульсной линии, осадок бора, полузакрытые клапаны, утечка разделительной жидкости, которые сложно выявить стандартными методами.

Проблема диагностики технического состояния актуальна в настоящее время. Специалистами в данной области разработаны методы диагностики неисправностей, возникающих в емкостных датчиках. Но, к сожалению, для преобразователей давления с тензометрическим принципом действия не было проведено столь глубокого исследования, поэтому данная работа направлена на получение дополнительной информации в этой области.

Цель данной работы: выявить признаки неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации датчика давления и разработать рекомендации по реализации алгоритмов диагностики технического состояния преобразователя давления.

Для достижения цели выпускной квалификационной работы необходимо выполнить следующие **задачи**:

- провести аналитический обзор существующих методов диагностики технического состояния датчиков давления;
- определить по сигналу с датчиков параметры, которые могут нести в себе информацию о неисправности;

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						5
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

- разработать модель измерительного преобразователя давления;
- сформировать практические рекомендации по выявленным закономерностям.

В данном исследовании рассматривается способ обнаружения неисправности, связанной с утечкой разделительной жидкости, в датчиках давления тензометрического типа по анализу его выходных сигналов.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	<i>Лист</i>
						6
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

1 ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. Анализ технического задания

В данной работе требуется рассмотреть влияние распространенных видов неисправностей в тензометрических датчиках давления.

Изучить, какие существуют неисправности в измерительных преобразователях такого типа, а также рассмотреть методы диагностики, которые применяются для их обнаружения.

По имеющимся кодам давления с реальных датчиков построить характеристики сигнала, выявить, какие из них могут нести в себе информацию о неисправности преобразователя.

Проанализировать современные методы моделирования датчиков такого типа.

Помимо этого, необходимо построить модель работы измерительного преобразователя, и на ее основе объяснить полученные закономерности, выявленные при обработке сигнала с датчика.

В заключительной части – сформировать практические рекомендации по выявленным закономерностям.

1.2. Принцип работы тензометрических датчиков давления

Под датчиком давления понимают устройство, параметры которого имеют зависимость от давления внешней среды, это могут быть пары, жидкости, газы и др. Для приема и передачи информации об измеренном давлении используют цифровой код или унифицированный сигнал.

В конструкции датчика давления выделяют чувствительный элемент – устройство для приема давления, электронные схемы обработки сигнала, элементы конструкции, служащие для герметизации датчика от нежелательных внешних воздействий и крепления, а также специальные устройства вывода информации.

Выделяют следующие способы измерения давления [1]:

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						7
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

- **тензометрический метод** основывается на тензорезистивном эффекте. В данном случае при деформации упругого элемента, на котором размещены тензорезисторы, их сопротивление изменяется, вследствие чего происходит изменение напряжения, снимаемого с выводов тензомоста, пропорционального измеряемому давлению;
- **ёмкостный метод** использует свойство изменения емкости конденсатора при изменении расстояния между его обкладками;
- в основе **резонансного метода** лежит изменение резонансной частоты упругого элемента, совершающего колебательное движение при воздействии на него силы или давления;
- **индуктивный метод** основан на обнаружении вихревых токов Фуко. В преобразователях такого типа чувствительный элемент включает в себя две катушки, которые изолированы друг от друга металлическим экраном;
- **ионизационный метод** заключается в применении особых свойств потока, состоящего из ионизированных частиц;
- в основе **пьезоэлектрического метода** лежит прямой пьезоэлектрический эффект. В данном случае пьезоэлементом генерируется электрический сигнал, который пропорционален действующему на него давлению.

В настоящее время на производстве используется большее количество датчиков давления с тензометрическим принципом действия, т.к. они имеют малую чувствительность к динамическим воздействиям, простую компенсацию температурных воздействий, а также имеют быстрое время отклика. Поэтому для данного исследования выбран тензометрический датчик давления, далее будет более подробно рассмотрена его конструкция и принцип действия.

Тензоэффект заключается в изменении деформации пленочных тензорезисторов, которые расположены на специальной подложке из сапфира (КНС) или на кремния (КНК), припаянной твердым припоем к стальной, реже титановой, мембране. В ряде случаев в зависимости от области применения в качестве тензорезисторов используют никелевые, медные и др.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						8
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

В датчике давления такого типа измерительная мембрана является чувствительным элементом. На ней располагаются тензорезисторы, соединенные в мостовую схему. При воздействии давления происходит прогиб мембраны, следовательно, происходит изменение сопротивления тензорезисторов, что в свою очередь приводит к разбалансу моста Уитсона. Разбаланс линейно зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от приложенного давления.

Стоит отметить, что преобразователи такого типа имеют ряд ограничений. Они обладают гистерезисными эффектами от воздействия температуры и давления, а также имеют временную нестабильность градуировочной характеристики, которая является неустранимой. Данные ограничения связаны с неоднородностью конструкции и наличием жесткой связи мембраны датчика с элементами конструкции [2].

В качестве примера будем исследовать измерительный блок тензометрического датчика давления Метран-150 ТГ/ТА (Рисунок 1.1), далее рассмотрим подробнее его конструкцию и принцип действия.

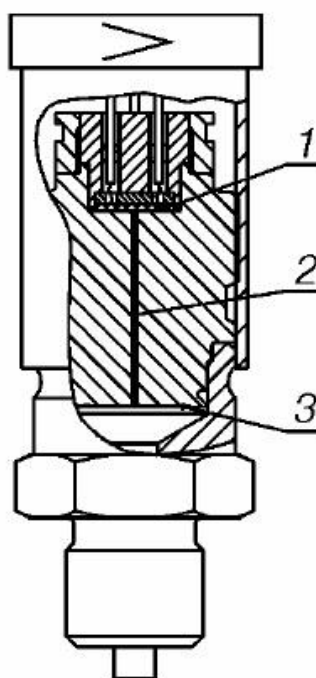


Рисунок 1.1 – Измерительный блок датчика давления

Измерительный блок рассматриваемого датчика содержит тензомодуль на кремниевой подложке. На пластине 1, состоящей из кремния, расположены пленочные тензорезисторы (структура кристалла КНК). Измеряемое давление воздействует на разделительную мембрану 3 и передается на чувствительный элемент тензомодуля через разделительную жидкость 2. Чувствительный элемент изменяет свое положение под воздействием приложенного давления, что приводит к изменению электрического сопротивления тензорезисторов, происходит разбаланс мостовой схемы [3].

Датчики давления с тензометрическим принципом действия используются во всех отраслях промышленности, в частности устанавливаются в системах регулирования, управления и контроля технологическими процессами. Они позволяют проводить измерение абсолютного и избыточного давления, а также давления агрессивных сред при помощи преобразования измеряемой величины в цифровой код или унифицированный токовый сигнал.

1.3. Сравнительный анализ известных методов диагностики состояния преобразователей давления

В соответствии с ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения», под технической диагностикой понимают определение технического состояния объекта. При этом задачами технического диагностирования являются контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирование технического состояния. Основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния (исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное). При осуществлении контроля технического состояния производится проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени [4].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						10
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

В данном разделе будет проведен обзор известных методов диагностики и метрологического самоконтроля датчиков давления.

Широко известны методы метрологического самоконтроля, описанные в статье Р.Е. Тайманова «Метрологический самоконтроль датчиков» [5]. Способ, основанный на применении плунжера и электромагнита в конструкции датчика, заключается в контроле метрологической неисправности, когда погрешность измерения связана с коррозией или остаточной деформацией мембраны. Такой метод реализован с помощью воздействия плунжером на мембрану датчика, связанным с сердечником электромагнита. Перед началом эксплуатации происходит снятие зависимости разности показаний датчика при прямом и обратном направлении калибровочного тока через катушку индуктивности от номинального давления. Далее при эксплуатации датчика происходит измерение разности показаний датчика при различных направлениях тока. Полученная разность сравнивается с эталонной при отсутствии тока и номинальном давлении. Разница между эталонным и текущим показаниями является критерием исправности датчика.

Разработке интеллектуального датчика давления с функцией метрологического самоконтроля посвящены работы сотрудников кафедры «Приборостроение» Пензенского государственного университета Белозубова Е.М., Васильева В.А., Чернова П.С., Суровцева Д.А., Смирнова И.И. [6]. Метрологический диагностический самоконтроль датчика реализован путем снятия трех напряжений с мостовой измерительной схемы и использования дополнительных функциональных зависимостей. Вводимая избыточность является комбинацией структурной и функциональной.

В работе [7] предложен способ метрологического самоконтроля тензорезистивного датчика давления. Данный способ основан на измерении напряжения питания и напряжения на измерительной диагонали моста. В данном случае рассматривается неисправность, возникающая в датчиках такого типа вследствие старения тензомоста в результате влияния внешних воздействий. Для

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						11
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

возможности корректировки зависимости сопротивления моста от изменения температуры моста используется полупроводниковый резистор, который установлен вблизи тензомоста.

В работе [8] приводится классификация методов диагностики элементов и структур микроэлектронных датчиков. Методы подразделяются по линейным эффектам (вольтамперных характеристик, вольтфарадных характеристик и по энергетически потерям), по нелинейным эффектам (анализ внутренних механических напряжений, по измерениям электрофизических характеристик, по наведенным полям – фототок), по функциональным эффектам (анализ низкочастотных шумов, анализ взрывных шумов, анализ вибрационных и акустических шумов). Для чувствительных элементов микроэлектронных датчиков с пьезорезисторами, включенными в мостовую схему, предлагается ряд частных оценочных информационно-энергетических параметров качества, по которым можно контролировать изготавливаемые изделия: начальный разбаланс моста, разброс номиналов пьезорезисторов, температурный коэффициент чувствительности, ток утечки и обратное напряжение.

Для диагностики дефектов в полупроводниковых чувствительных элементах микроэлектронных датчиков сотрудником Пензенского государственного университета Михайловым П.Г. [9] предложено применение методов самоконтроля при использовании измерений низкочастотных шумов и метода оптического сканирования. Такие методы применимы для чувствительных элементов и измерительных модулей на этапе производства, и не используются для диагностики технического состояния приборов в процессе эксплуатации.

В работах сотрудников Южно-Уральского государственного университета рассматривается метод диагностики состояния преобразователей давления на основе возбуждения собственных колебаний конструкции тестовыми ультразвуковыми импульсами [10]. Тестовые воздействия могут быть реализованы как с помощью встроенного излучателя, так и путем размещения источника воздействий за границами датчика, например в клапанном блоке.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						12
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Для диагностики состояния датчиков давления, используемых в атомной промышленности, руководитель компании Analysis and Measurement Services (AMS) Corp. (США) Х. Хашемиан (H. Hashemian) предлагает использовать измерение постоянной времени переходной характеристики (*response time*) датчиков с помощью анализа шума [11]. Метод основан на контроле естественных флуктуаций в технологическом процессе, которые влияют на выходной сигнал датчика в процессе его работы. Эти флуктуации возникают случайным образом в результате случайного движения, теплопередачи, турбулентных потоков, вибраций, управляющих воздействий и т.п.

Метод анализа шума обладает преимуществами по сравнению с традиционными подходами к техническому обслуживанию, поскольку позволяет учитывать влияние длины импульсных линий, их блокировки или появления пустот. Он предоставляет возможность удаленного, пассивного тестирования; позволяет избежать радиационного воздействия на персонал; исключить человеческий фактор; сократить время простоя оборудования для технического обслуживания; применим для множества датчиков одновременно.

Для того чтобы метод позволял делать точные оценки необходимо выполнение пяти основных условий:

- 1) флуктуации процесса должны быть широкополосными (по крайней мере, их полоса частот должна быть шире, чем датчика);
- 2) датчик должен быть преимущественно линейным;
- 3) флуктуации процесса должны быть достаточно мощными, чтобы вызвать измеримые возмущения в выходном сигнале;
- 4) шум на входе и выходе датчика должен иметь нормальное (гауссово) распределение;
- 5) в спектре процесса не должно быть значительных резонансов.

Если эти условия не выполняются, то оценки не могут быть точными, но все же некоторая польза от применения метода может быть, например, обнаружение

									Лист
									13
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат					

существенных отклонений параметров выходного сигнала от ожидаемых значений.

Процедура метода анализа шума представляет собой последовательность следующих этапов: запись выходного сигнала датчика (при частоте дискретизации 1 кГц), вычитание DC компонента, усиление, фильтрация, оцифровка и анализ сигнала с целью оценки постоянной времени датчика. Для оценки собирают данные в течение одного часа (до 3,6 млн отсчетов). Постоянную времени определяют по спектральной плотности мощности выходного сигнала. Также при вычислениях определяют плотность распределения вероятности шума и проверяют гипотезу о нормальности.

1.4. Описание видов отказов преобразователей давления

В соответствии с ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» [12] под техническим состоянием объекта понимается состояние, характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях.

При разработке методов диагностики и контроля технического состояния объекта необходимо задание множества видов его технического состояния и указание параметров, характеризующих заданные состояния объекта. Основные технические состояния объекта: исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное [4].

Исправное состояние – это состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в документации на него. **Неисправное состояние** – состояние объекта, в котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации. Несоответствие хотя бы одному из предъявляемых требований может быть определено как состояние, в котором значение хотя бы одного параметров объекта не соответствует требованиям документации на этот объект.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						14
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Работоспособное состояние – состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции, то есть значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в документации на этот объект. **Неработоспособное состояние** – состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям документации на объект. Объект может выполнять одни функции и одновременно не способен выполнять другие – в этом случае он находится в частично работоспособном состоянии.

Датчик давления является средством измерений, следовательно, имеет нормированные метрологические характеристики, которые и являются параметрами, характеризующими его функционирование. К метрологическим характеристикам средств измерений относятся функция преобразования измерительного преобразователя; вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода СИ, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде; составляющие погрешности; чувствительность; диапазон измерений и др. [13].

В широком смысле под метрологической исправностью средства измерений понимают состояние, при котором все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям [14]. Основной метрологической характеристикой является погрешность, поэтому, в соответствии с ГОСТ Р 8.673-2009, метрологическая исправность датчика в процессе эксплуатации – это состояние датчика, при котором его погрешность в процессе эксплуатации в рабочих условиях находится в установленных пределах [15]. К сожалению, применяемые в настоящее время подходы к метрологическому обслуживанию датчиков (периодическая поверка и калибровка) не позволяют контролировать метрологическую исправность датчика в процессе эксплуатации. Для решения этой задачи необходима разработка алгоритмов метрологического самоконтроля датчиков.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						15
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Для целей данного исследования целесообразным представляется определить исправное состояние датчика в смысле его метрологической исправности. А работоспособное состояние датчика связать с его способностью преобразовывать давление рабочей среды в выходной сигнал.

Между работоспособным/неработоспособным и исправным/неисправным состояниями датчика существует логическая связь. Если датчик исправен, то он работоспособен, то есть он способен правильно преобразовывать сигнал, и погрешность измерения не превышает допустимых пределов. Если датчик неработоспособен, то он и не исправен. Если же датчик неисправен (то есть погрешность измерения выходит за допустимые пределы), то при этом он может быть как работоспособен, так и неработоспособен. Также если он работоспособен, то он может быть как исправным, так и неисправным.

При разработке методов диагностирования необходимо проводить анализ отказов объектов диагностирования, а также выявлять параметры, значения которых можно контролировать в процессе эксплуатации, желательно автоматически и без необходимости демонтажа и разборки.

Под отказом понимается «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта» [5]. Существуют различные виды отказов, которые классифицируют по различным критериям: характеру, причине, последствиям отказа, функции, способность которой потеряна, или изменению состояния объекта.

Отказы могут быть независимыми или зависимыми (обусловленными другими отказами), критическими или некритическими, внезапными или постепенными, явными и скрытыми и т.д.

Отказы, связанные с эксплуатацией, возникают в случае нарушения правил и условий эксплуатации измерительного преобразователя. Естественные процессы старения, коррозии, усталости и износа приводят к возникновению деградационных отказов. Отказы в процессе эксплуатации также могут быть

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						16
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

связаны с нарушением процессов изготовления, сборки, приработки узлов и др. (производственные отказы).

Постепенные отказы вызваны постепенным изменением значений одного или нескольких параметров объекта [5]. А внезапные отказы обусловлены резким переходом объекта в неработоспособное состояние. По мере совершенствования методов и средств диагностирования все большее число внезапных отказов рассматриваются как постепенные.

Диагностирование не ограничивается определением технического состояния объекта, но также включает в себя поиск места и определение причин отказа (неисправности). Как правило, причиной полного или частичного отказа является дефект. В общем случае дефект – это каждое отдельное «несоответствие свойств объекта заданным, требуемым или ожидаемым его свойствам» [9], некоторое «недопустимое отклонение от нормы» [10]. Для целей диагностики определяют множество возможных дефектов, которое включает в себя описание причин возникновения неисправности, описание дефекта, характера возникновения отказа, все это дает возможность отличить данный дефект от всех других [10].

Рассматриваемый в данном исследовании датчик давления тензометрического типа представляет собой систему, состоящую из подсистем, каждая из которых обладает особыми функциями.

Можно выделить следующие подсистемы, составляющие датчик.

1. Механико-гидравлическая система преобразователя давления, включающая в себя разделительную мембрану, разделительную полость, заполняющую жидкость.

2. Тензопреобразователь (чувствительный элемент, сенсор), включающий в себя кремниевый кристалл, тензорезисторы, токопроводящие дорожки, контактную площадку.

3. Аналого-цифровой преобразователь.

4. Электронный преобразователь.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						17
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Каждая из указанных подсистем выполняет определенные функции, которые характеризуются определенными параметрами. Далее для каждой подсистемы будут рассмотрены возможные причины отказов.

Механико-гидравлическая система (МГС) преобразователя давления представляет собой часть датчика, на которую непосредственно действует рабочая среда. Также к ней крепятся монтажные детали для установки и присоединения к технологическому процессу. Основная функция механико-гидравлической системы – преобразование давления рабочей среды в деформацию измерительной мембраны тензопреобразователя. Данная система необходима для защиты чувствительного элемента от воздействия рабочей среды. Отказ системы приводит к ее неспособности передавать давление рабочей среды на измерительную мембрану, и датчик переходит в неработоспособное состояние. Например, вытекание жидкости приводит к нарушению механической связи между измеряемой средой и сенсором. Отказ данной системы проявляется, как отсутствие технической возможности выполнять требуемую функцию.

Состояние механико-гидравлической системы характеризуется ее физическими параметрами – массой, жесткостью, геометрическими размерами элементов системы и др. Дефекты механико-гидравлической системы могут приводить к ее отказу, но в общем случае она может выполнять свою функцию и при возникновении незначительных дефектов, хотя при этом изменяется функция преобразования и увеличивается погрешность измерения.

Тензопреобразователь представляет собой наиболее чувствительную часть датчика. Основная функция тензомодуля – преобразование деформации измерительной мембраны в аналоговый электрический сигнал, который образуется вследствие разбаланса мостовой схемы. Далее с помощью встроенного сигма-дельта АЦП происходит измерение электрического сигнала. Полученные результаты передаются в электронный преобразователь, который преобразует это изменение в выходной сигнал.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						18
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Из опыта эксплуатации известно, что могут происходить следующие нежелательные события: изменение напряжённо-деформированного состояния сварного шва, соединяющего мембрану с корпусом капсулы, развитие трещин, коррозионное разрушение, механические деформации; повреждения разделительной мембраны, причиной которых могут быть как нарушение условий эксплуатации (коррозия, механические повреждения), так и скрытые дефекты на производстве (нарушение технологии, дефект комплектующих); нарушение герметичности капсулы (внутренняя полость) и утечка жидкости через сварные соединения элементов конструкции капсулы; загрязнение разделительной полости и (или) жидкости, недостаточная дегазация жидкости.

Рассмотренные выше причины приводят к постепенному ухудшению заявленных метрологических характеристик, без явных признаков нарушения работоспособности. Для осуществления контроля над метрологической неисправностью датчика необходимо разработать специальные методики, которые позволят следить за состоянием датчика и выявлять неисправность на начальных стадиях ее возникновения.

В литературе описаны следующие причины отказов датчиков давления. В источнике [16] в качестве причины выхода из строя тензопреобразователя указано нарушение целостности диафрагмы из-за гидравлических ударов или существенных пульсаций давления.

В [11] указаны потенциальные причины деградации характеристик датчиков давления, использующихся в атомной промышленности, которые оказывают влияние на метрологические характеристики датчиков. К ним относятся:

- полная или частичная потеря заполняющей жидкости (вследствие высокого давления и недостатков конструкции);
- изменение вязкости заполняющей жидкости (вследствие влияния радиации или температуры);
- износ механических деталей датчика (вследствие колебаний давления, коррозии и окисления);

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						19
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

- разрушение уплотнительных элементов, что приводит к попаданию жидкости в электронный блок датчика (вследствие растрескивания уплотнений из-за радиации и нагревания);
- протекание рабочей жидкости в жидкость ячейки, что приводит к изменению температуры, вязкости жидкости и т.п. (вследствие разрушения уплотнений, недостатков конструкции или скрытых производственных дефектов, разрушения чувствительных элементов);
- изменение характеристических значений электронных компонентов (вследствие нагревания, радиации, влажности, изменения напряжения питания, неправильного обслуживания);
- изменение жесткости мембран и сильфонов (вследствие механической усталости и переменного давления).

Датчики давления способны самостоятельно выявлять ряд неисправностей, такие как превышение питающего напряжения и нахождение измеряемой величины за границами измерительного диапазона. Но, как было отмечено выше, помимо этого существует множество и других видов отказа.

Один из наиболее интересных для настоящего исследования дефектов – это полная или частичная потеря (утечка) жидкости в полости между разделительной мембраной и кремниевым кристаллом (измерительной мембраной).

Проблеме обнаружения потери жидкости в разделительной полости емкостного датчика давления посвящен ряд исследований начиная с 1990 года, когда эта проблема впервые была сформулирована в США после инцидентов на атомных электростанциях 1986-1987 годов [17]. В результате анализа причин возникновения неисправности было установлено, что утечка жидкости возникала из-за использования в конструкции датчика уплотнительного кольца из нержавеющей стали, что приводило к повышенным механическим напряжениям в измерительном модуле.

В работе [18] признаками возникновения данной неисправности называют искажение характеристик шумового сигнала, появление асимметрии в

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						20
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

распределении вероятности его амплитуды, уменьшение амплитуды пропорционально уровню неисправности, появление различия в наклоне кривых положительного и отрицательного давления и нелинейности в функции преобразования, асимметрии в отклике на синусоидальное входное воздействие. Потеря жидкости проявляется в дрейфе нуля, что можно обнаружить при калибровке. В процессе эксплуатации для обнаружения неисправности используют анализ шума.

Вывод по первому разделу: в данной главе был проведен анализ технического задания на выпускную квалификационную работу.

Исследовано современное состояние в области диагностики технического состояния датчиков давления. Рассмотрены существующие виды отказов и неисправностей преобразователей давления.

Выявлено, что специалистами в области диагностики технического состояния датчиков давления разработаны методы диагностики неисправностей, возникающих в емкостных датчиках. Но для преобразователей давления с тензометрическим принципом действия не было проведено столь глубокого исследования.

Для расширения информации в области диагностики данная работа направлена на выявление признаков неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации датчиков давления и разработку практических рекомендаций по реализации алгоритмов диагностики технического состояния преобразователя давления.

В данном исследовании рассматривается способ обнаружения неисправности, связанной с утечкой разделительной жидкости, в датчиках давления тензометрического типа по анализу его выходных сигналов.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						21
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

2 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Выбор метода анализа данных наблюдений над случайным процессом зачастую зависит от того, какое физическое явление представляет физический процесс, и от целей, которые ставятся перед началом исследования. В общем виде можно определить последовательность (Рисунок 2.1) действий [19] при осуществлении данной процедуры:

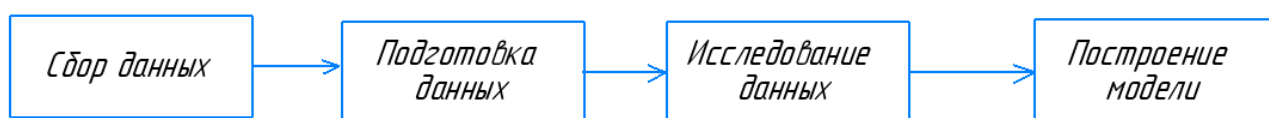


Рисунок 2.1 – Основные этапы анализа данных

В данном разделе особое внимание будет уделено оцениванию свойств исследуемых данных по средствам методов статистики и обработки сигналов.

2.1. Сбор данных

Сигналы с датчиков давления были предоставлены в качестве исходных данных. В ходе испытаний с помощью пневматического задатчика давления и гидропроливочного стенда Аэрокосмического факультета ЮУрГУ (ауд. 101/2) были получены коды давления с исправных и неисправных модулей.

В качестве пневматического задатчика давления использовался портативный калибратор давления Метран 501-ПКД-Р с пневматическим ручным насосом Н-2,5. Диапазон измерения давления от -80 кПа до 2,5 МПа.

В качестве испытуемых образцов были исследованы датчики Метран-150 штуцерного исполнения. Диапазон измерения давлений таких датчиков составляет 0,0104 – 1,034 МПа. Основная приведенная погрешность до $\pm 0,065\%$. Материал мембраны – нержавеющая сталь 316L. Заливочная жидкость: Silicone DC200 industrial.

Неисправные модули имеют следующие параметры:

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						22
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Таблица 2.1 – Параметры неисправных модулей

№ п/п	Тип датчика	Процент заполнения жидкостью
1	Метран-150 TG2	83%
2	Метран-150 TG2	84%
3	Метран-150 TG2	87%
4	Метран-150 TG2	89%
5	Метран-150 TG2	94%

Выходной сигнал исследуемых измерительных модулей представляет собой значения кодов АЦП с частотой дискретизации 22 Гц. Количество собранных данных с одного модуля при одном установленном значении давления в испытаниях составило 20 000 отсчетов.

2.2. Подготовка данных

Данная часть, посвящена подготовке данных для детального анализа. Достоверность полученных в итоге результатов зависит от определенных основных свойств сигнала, которые необходимо выявить еще на этапе подготовки. К их числу обычно относят выявление тренда и определение вида закона распределения.

2.2.1. Выявление тренда

При анализе случайных данных необходимо выяснить, являются ли наблюдения статистически независимыми или же они подвержены тренду.

Под трендом понимают сформировавшееся направление развития явления во времени под воздействием постоянно действующих факторов.

Для выявления тренда чаще всего применяют *критерий серий* и *критерий инверсий*. Для обнаружения монотонного тренда чаще все применяют критерий инверсий, т.к. он считается мощнее, чем критерий серий, поэтому для выявления тренда будем использовать **метод инверсий**.

Рассмотрим более подробно реализацию метода инверсий.

Рассматривается последовательность из n наблюдений случайной величины x_i (где $i = 1, 2, \dots, n$). Далее вся выборка разбивается на N равных интервалов, в каждом из которых подсчитывается среднее значение, дисперсия или средний квадрат. После этого необходимо подсчитать, какое количество раз в последовательности имеют место неравенства $b_i > b_j$ при $i < j$, где b – статистическая характеристика величины в одном из интервалов (например, средний квадрат). Каждое такое неравенство принято называть инверсией, а общее их количество обозначают A .

В общем случае алгоритм определения A можно представить следующим образом:

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1, & b_i > b_j \\ 0, & b_i \leq b_j \end{cases}$$

Тогда

$$A = \sum_{i=1}^{N-1} A_i,$$

где

$$A_i = \sum_{j=i+1}^N h_{i,j},$$

По сформированному алгоритму в среде MATLAB (Приложение А), подсчитаем количество инверсий в исследуемом процессе, занесем полученные данные в таблицу 2.1.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						24
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Таблица 2.1 – Количество инверсий в исследуемом процессе

Количество разделительной жидкости	Количество инверсий A
Исправные датчики	
100%	4735
100%	4689
Неисправные датчики	
83%	4950
84%	4945
87%	4845
89%	4959
90%	4214
94%	4597

Рассматриваем гипотезу о том, что наблюдения представляют собой независимые исходы случайной величины (не имеют тренда). Т.е. подсчитанное значение инверсий должно удовлетворять следующему условию [20]:

$$A_{N,1-\frac{\alpha}{2}} < A < A_{N,1-\frac{\alpha}{2}}$$

где A – общее количество инверсий;

N – количество элементов в выборке;

α – уровень значимости.

В исследуемом случае выборка была разделена на 100 равных интервалов, поэтому при уровне значимости $\alpha = 0,05$ будем иметь следующую область принятия гипотезы [20]:

$$2145 < A < 2804, \quad (1)$$

Исходя из данных, отраженных в таблице 2.1 гипотеза о независимости исходов случайной величины должна быть отвергнута с уровнем значимости 5%, так как рассчитанные значения не попадают в интервал (1).

Следовательно, можно сделать вывод, что в рассматриваемом процессе присутствует тренд. Далее необходимо выявить его и удалить из сигнала. Для этого воспользуемся встроенной функцией **smooth** в среде MATLAB, которая выполняет алгоритм фильтрации с помощью метода скользящего среднего.

Результат реализации этой функции можно представить на графике (Рисунок 2.2):

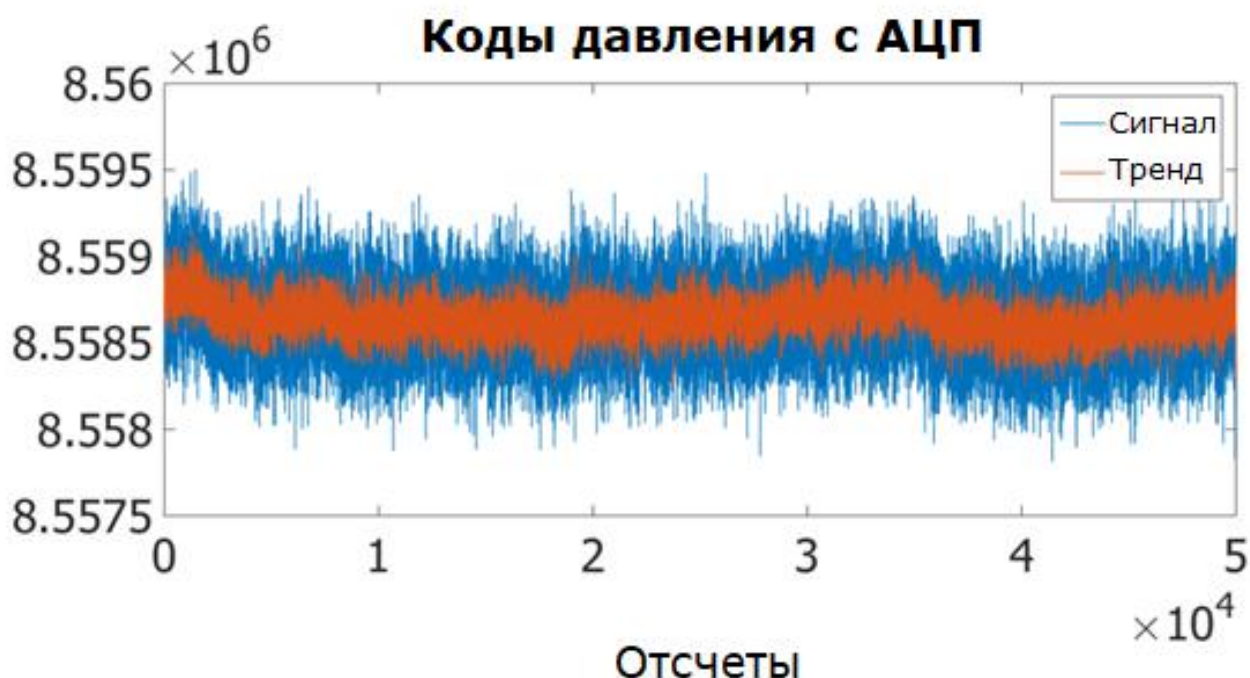


Рисунок 2.2 – Зависимость кодов давления и тренд сигнала

На графике синим цветом отмечен исследуемый сигнал с одного из датчиков, а оранжевым цветом – тренд сигнала, выявленный с помощью функции **smooth**.

При удалении тренда из сигнала получим шум сигнала, представленный на рисунке 2.3:

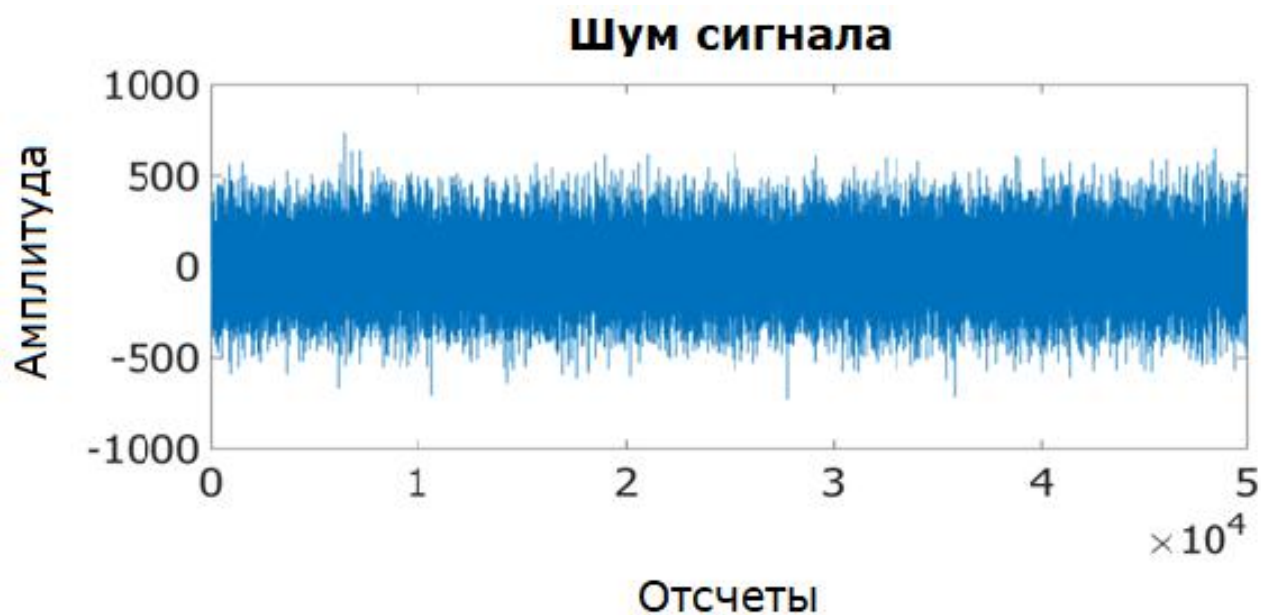


Рисунок 2.3 – Шум сигнала

Данная процедура проведена для всех исследуемых данных, далее новые последовательности проверены на статистическую независимость по тому же критерию. Полученные результаты представлены в таблице 2.2:

Таблица 2.2 – Количество инверсий после удаления тренда

Количество разделительной жидкости	Количество инверсий A
Исправные датчики	
100%	2548
100%	2604
Неисправные датчики	
83%	2547
84%	2647
87%	2522
89%	2619
90%	2206
94%	2314

Из данных, отраженных в таблице 2.2, видно, что количество инверсий попадает в интервал (1), следовательно, гипотезу о независимости исходов случайной величины можно принять.

2.2.2. Проверка на нормальность закона распределения

Предположение о нормальности закона распределения позволяет существенно упростить аналитическое решение, поэтому проверка данной гипотезы желательна на этапе постобработки.

Для проверки на нормальность закона распределения воспользуемся критерием *Колмогорова-Смирнова*. Данный критерий заключается в проверке гипотезы $H_0: F_n(x) = \Phi(x)$, где $F_n(x)$ – эмпирическая функция распределения случайной величины, $\Phi(x)$ – теоретическая функция распределения с точно определенными параметрами нормального закона распределения [21].

В качестве примера рассмотрим выборку для датчика с потерей жидкости 6% при давлении 100 кПа.

Необходимо определить среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = 0,026,$$

где \bar{x} – среднее значение;

n – количество элементов в выборке;

x_i – значение i -ого элемента выборки.

и среднее квадратическое отклонение (СКО):

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 233,$$

где s – СКО.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						28
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Далее рассчитаем значение z_i :

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s},$$

В качестве результатов расчета приведен фрагмент полученных данных в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Рассчитанные значения по критерию Колмогорова-Смирнова

i	x_i	z_i	(z_i)	$\frac{i}{n}$	$\frac{i-1}{n}$	$\frac{i}{n} - (z_i)$	$(z_i) - \frac{i-1}{n}$
1	-83,33	-0,357	0,3604	0,0005	0,0000	-0,3599	0,3604
2	137,80	0,591	0,7228	0,0010	0,0005	-0,7218	0,7223
3	-308,71	-1,324	0,0928	0,0015	0,0010	-0,0913	0,0918
4	-355,22	-1,523	0,0638	0,0020	0,0015	-0,0618	0,0623
5	146,67	0,629	0,7354	0,0025	0,0020	-0,7329	0,7334
6	162,89	0,699	0,7576	0,0030	0,0025	-0,7546	0,7551
7	-76,89	-0,330	0,3708	0,0035	0,0030	-0,3673	0,3678
8	-175,11	-0,751	0,2263	0,0040	0,0035	-0,2223	0,2228
9	-415,78	-1,783	0,0373	0,0045	0,0040	-0,0328	0,0333
10	87,22	0,374	0,6459	0,0050	0,0045	-0,6409	0,6414

Из всей таблицы данных находим значения:

$$D^+ = \max\left(\frac{1}{n} - \Phi(z_i)\right) = 0,3171; \quad D^- = \max\left(\Phi(z_i) - \frac{i-1}{n}\right) = 0,1784,$$

$$D = \max(D^+, D^-) = 0,3171,$$

Далее рассчитываем критическую статистику по формуле:

$$D^{\text{норм}} = D \cdot \left(\sqrt{n} - 0,01 + \frac{0,85}{\sqrt{n}} \right) = 0,763,$$

Критическое значение статистики Колмогорова-Смирнова, модифицированной для проверки нормальности распределения для уровня значимости $\alpha = 0,05$ равно $D^{\text{норм}}(\alpha) = 0,895$ [21].

Т.к. $D^{\text{норм}} = 0,763 < D^{\text{норм}}(\alpha) = 0,895$, гипотезу о нормальности закона распределения можно принять.

Проведя проверку для остальных данных, нормальность закона распределения также подтвердилась.

2.3. Оценивание основных свойств

На рисунках 2.4 – 2.9 представлены реализации выходных сигналов исправного и неисправных модулей, соответствующие входным давлениям 0, 100, 200, 300, 400 и 500 кПа, изображенные на одном графике для каждого измерительного модуля.

Данные графики представляют собой разность между исследуемыми кодами давления и средним значением кода при нулевом давлении.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						30
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

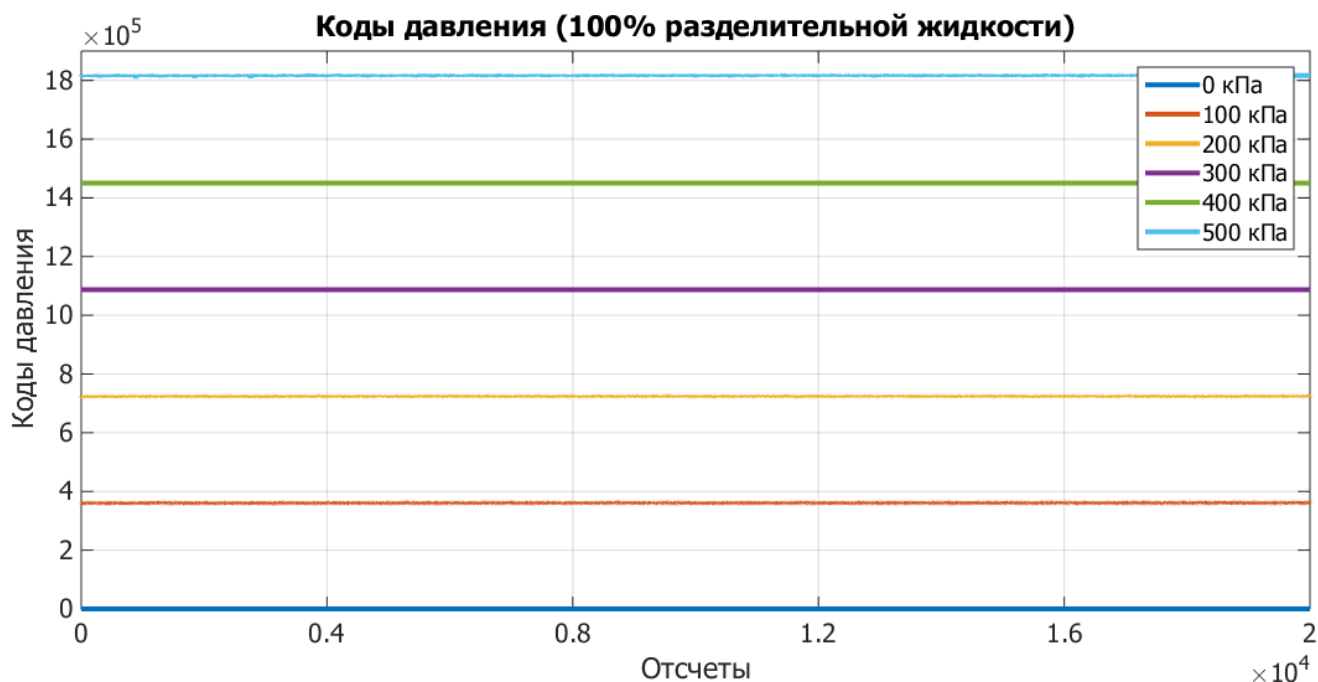


Рисунок 2.4 – Зависимость среднего значения выходного сигнала от входного давления для исправного модуля

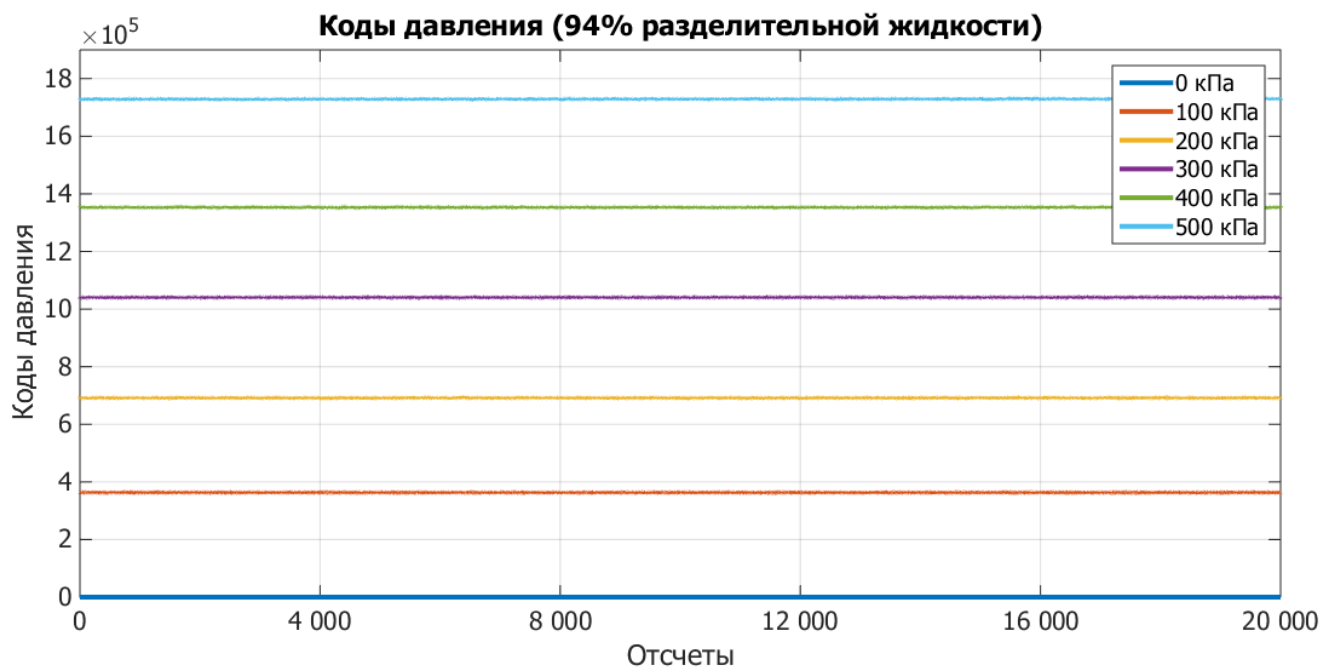


Рисунок 2.5 – Зависимость среднего значения выходного сигнала от входного давления для неисправного модуля с 94% заполнением разделительной жидкости

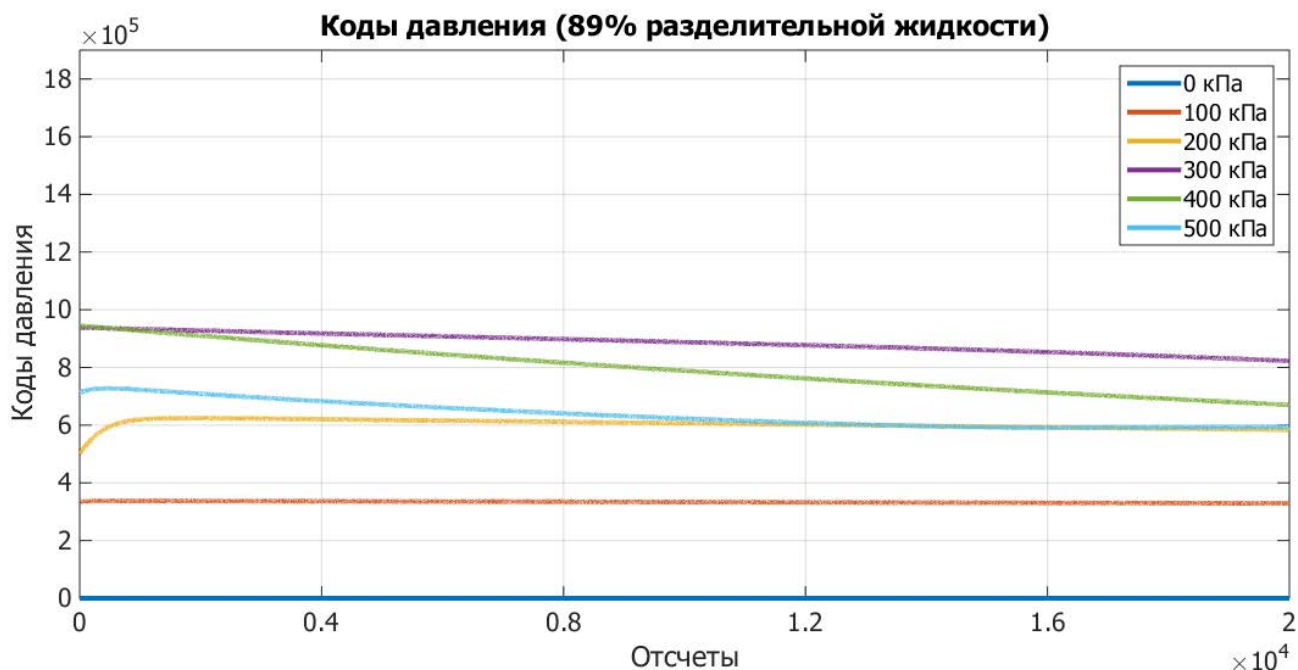


Рисунок 2.6 – Зависимость среднего значения выходного сигнала от входного давления для неисправного модуля с 89% заполнением разделительной жидкости

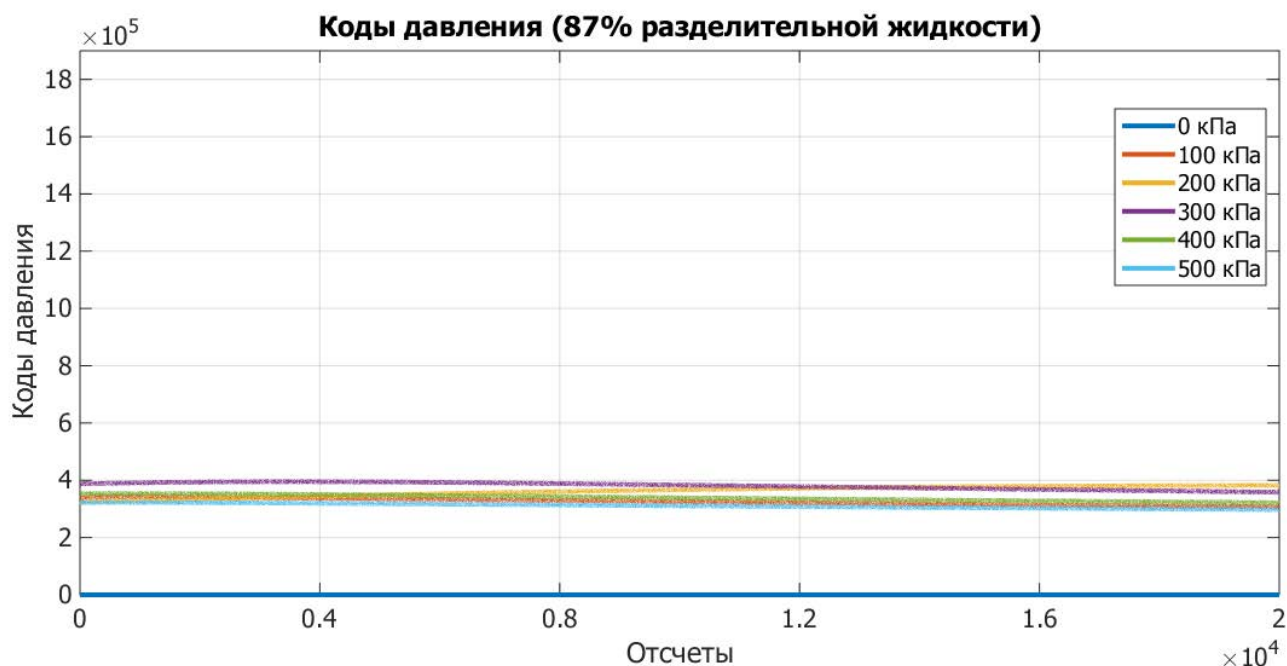


Рисунок 2.7 – Зависимость среднего значения выходного сигнала от входного давления для неисправного модуля с 87% заполнением разделительной жидкости

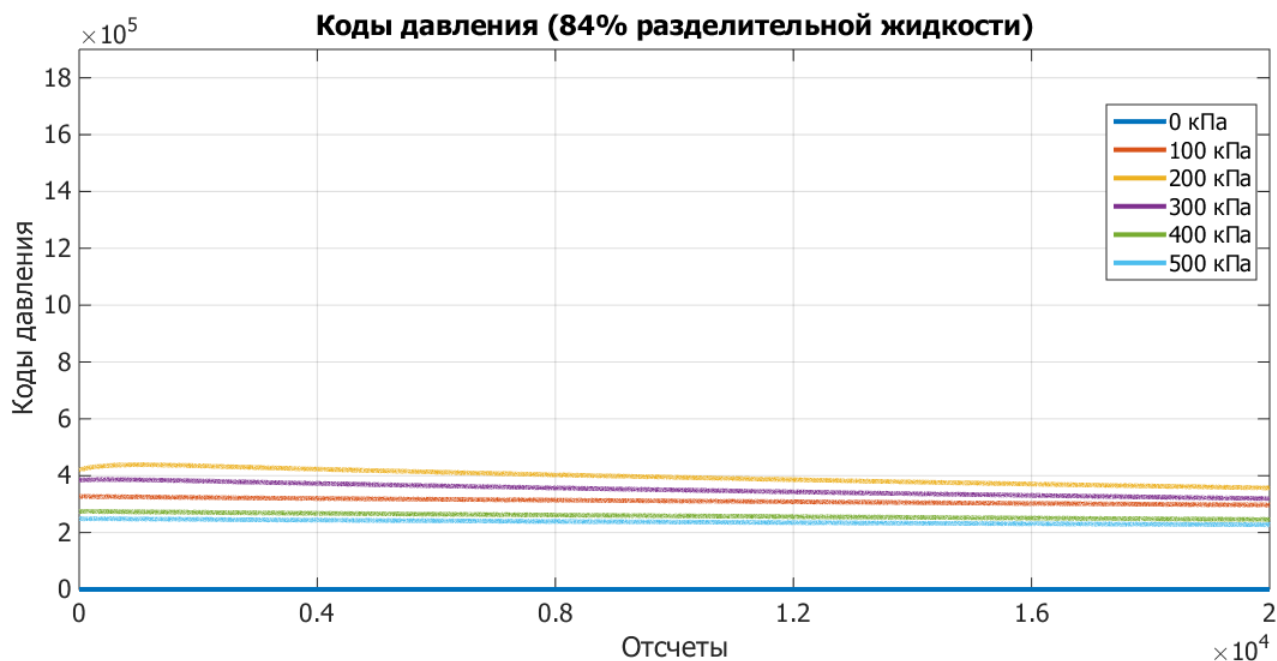


Рисунок 2.8 – Зависимость среднего значения выходного сигнала от входного давления для неисправного модуля с 84% заполнением разделительной жидкости

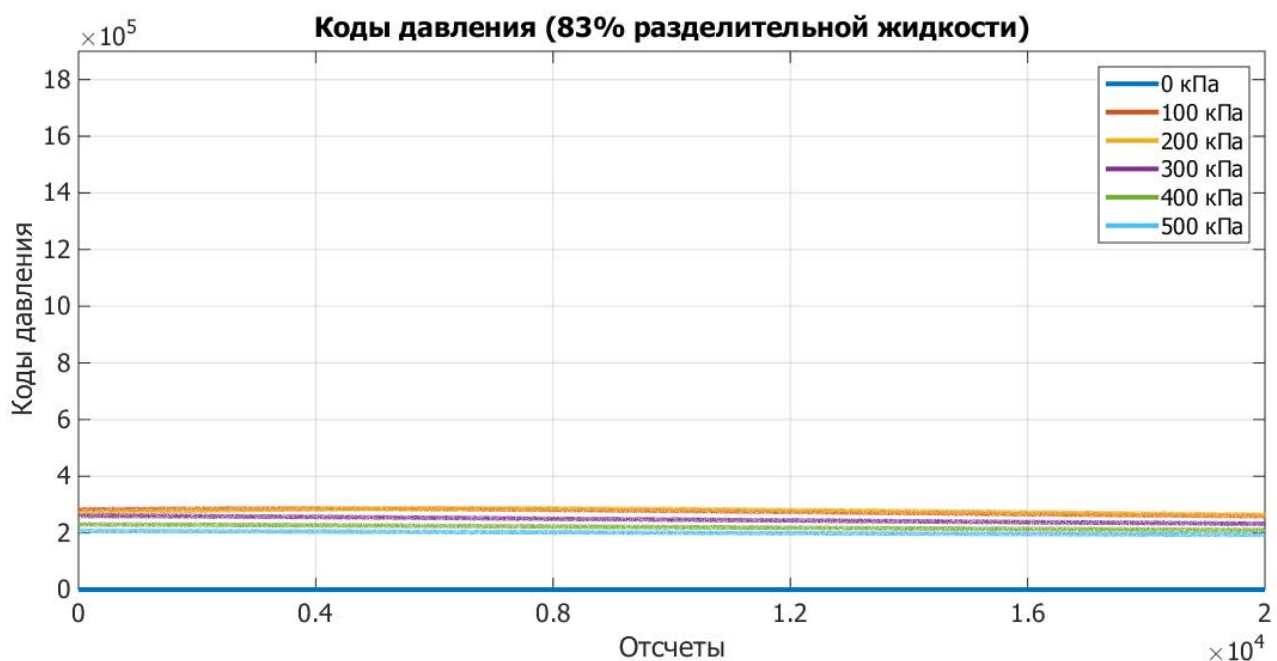


Рисунок 2.9 – Зависимость среднего значения выходного сигнала от входного давления для неисправного модуля с 83% заполнением разделительной жидкости

На графиках видно, что модули с количеством разделительной жидкости 89% и менее существенно занижают значения выходных кодов АЦП при соответствующем значении входного давления.

Зависимость среднего значения выходного сигнала представлена на рисунке 2.10 для неисправных модулей с различным количеством разделительной жидкости.

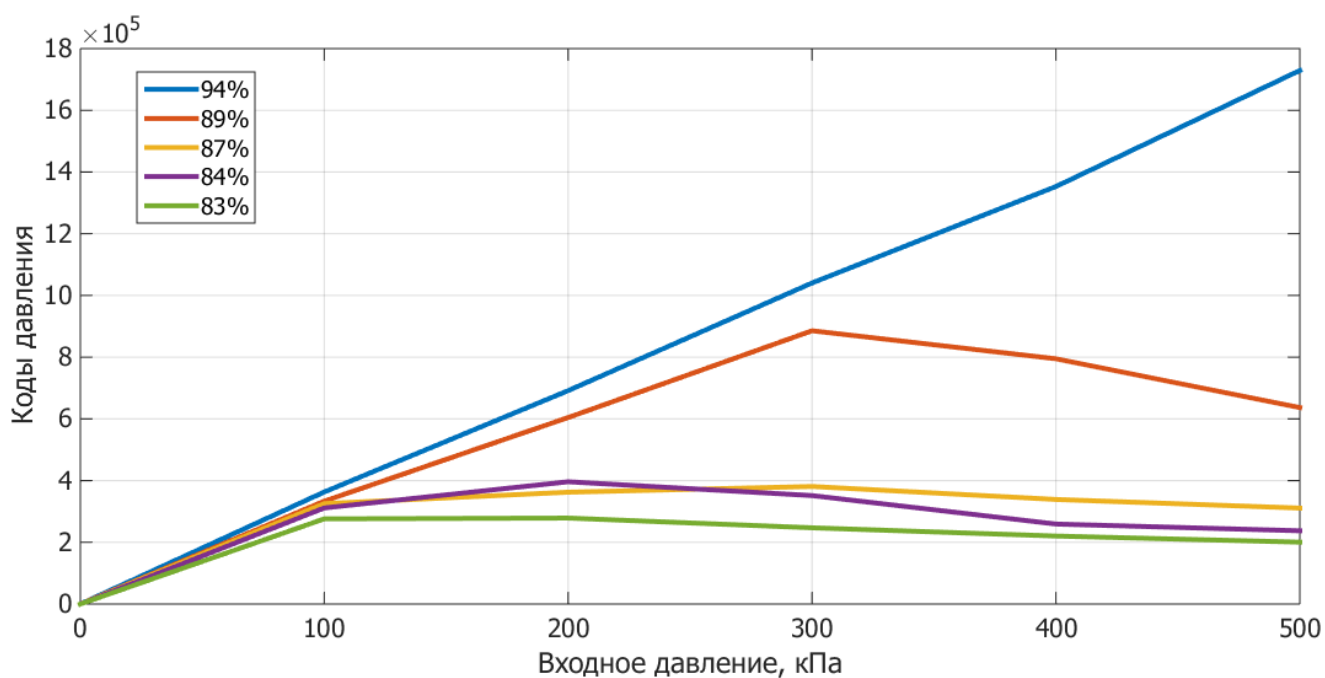


Рисунок 2.10 – Статическая характеристика неисправных датчиков давления

Как видно из графика датчик с 94% заполнением разделительной жидкости имеет почти линейную зависимость, схожую с характеристикой для исправных датчиков.

На основе анализа литературы можно сформулировать гипотезу о том, что статистические характеристики во временной и частотной области зависят от состояния датчика, т.е. при возникновении дефекта меняются значения некоторых статистических и частотных характеристик.

В качестве характеристик сигнала, которые могут стать диагностическими параметрами, могут быть выбраны [20]:

- среднеквадратичное отклонение (СКО):

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

где S – СКО;

N – количество элементов в выборке;

x_i – значение i -ого элемента выборки;

\bar{x} – среднее значение.

- коэффициент асимметрии:

$$\gamma_1 = \frac{1}{(N-1)S^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3, \quad (3)$$

где γ_1 – коэффициент асимметрии.

В соответствии с сформулированными гипотезами были проведены расчеты статистических характеристик (2) и (3) на основе экспериментальных данных для исправных и неисправных измерительных модулей.

Оценки были получены путем обработки 20 реализаций каждого сигнала длительностью 1000 отсчетов каждый, на основании расчетов было получено среднее выборочное каждой оценки. Также рассчитывался разброс средней оценки, который на графиках приведен в виде интервала в 2σ (σ – в данном случае – СКО выборочных оценок искомого параметра по 20 реализациям). Вероятность попадания случайной величины в интервал $\pm 2\sigma$ составляет 95%.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						35
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

2.3.1. Результаты расчета характеристик сигнала исправных датчиков

На рисунках 2.11 – 2.12 представлены оценки вышеуказанных статистических параметров для трех исправных измерительных модулей, соответствующие трем значениям входного давления – 25, 50 и 75 кПа.

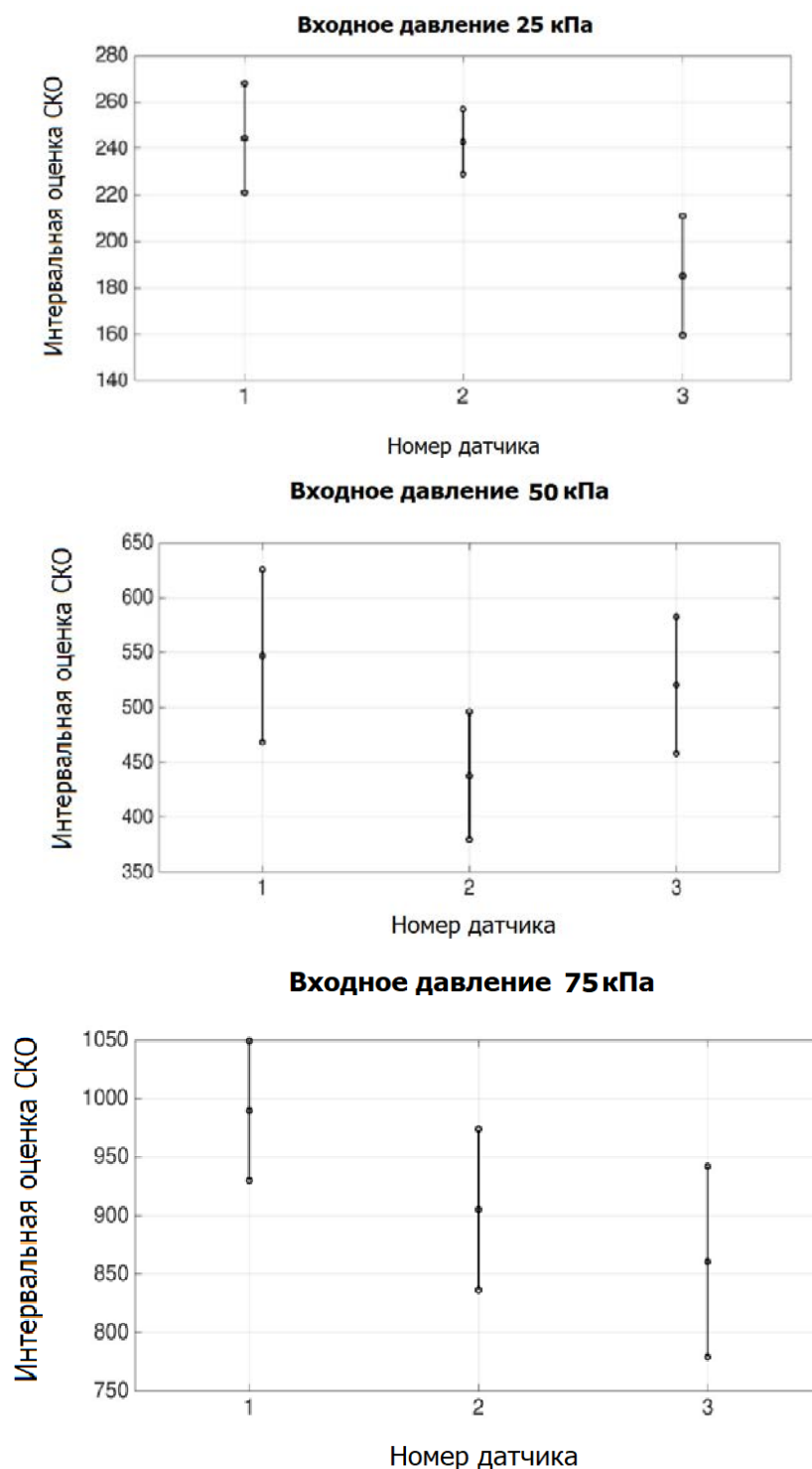


Рисунок 2.11 – Оценки СКО выходных сигналов исправных модулей, соответствующие входным давлениям 25, 50 и 75 кПа

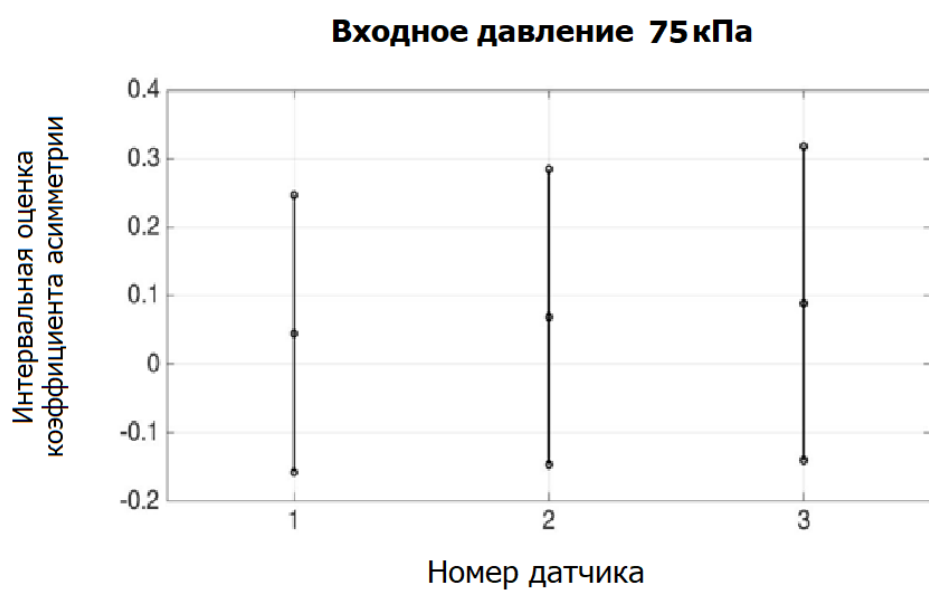
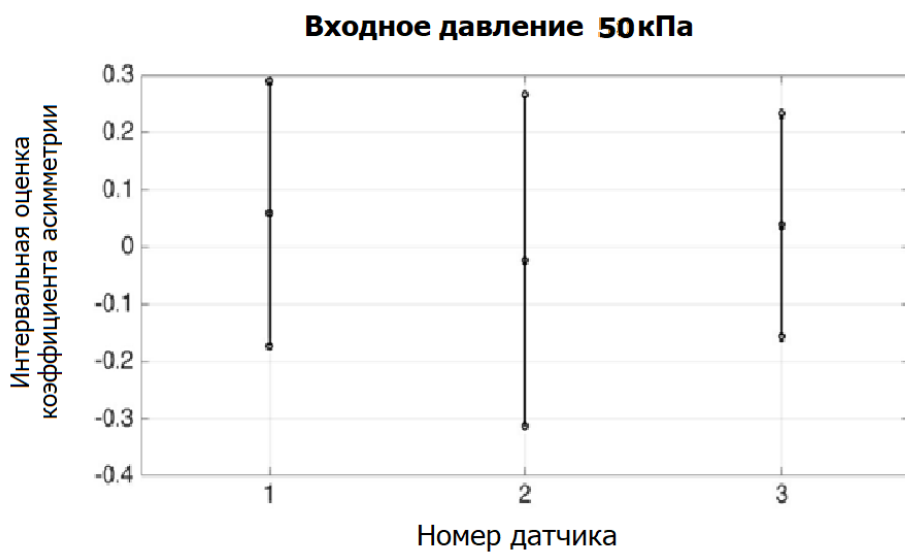
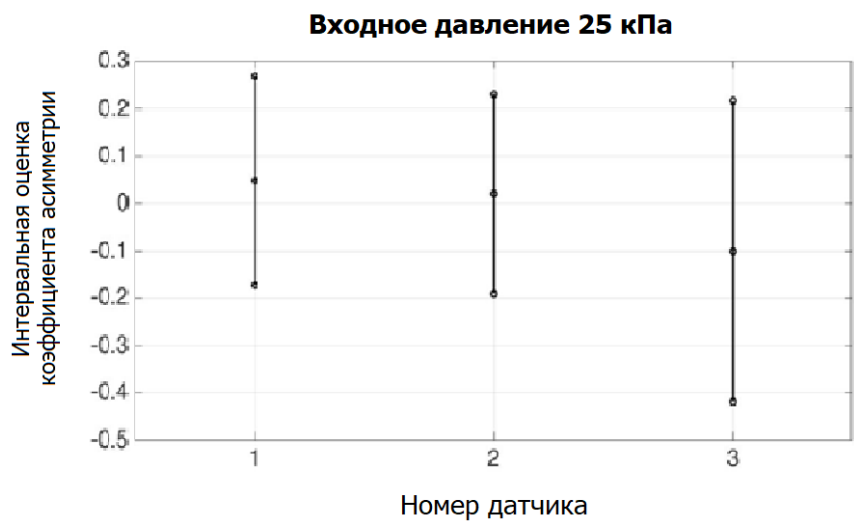


Рисунок 2.12 – Оценки коэффициента асимметрии выходных сигналов исправных модулей, соответствующие входным давлениям 25, 50 и 75 кПа

Таблица 2.3 – оценки СКО и коэффициента асимметрии для исправного измерительного модуля

Входное давление, кПа	СКО	Коэффициент асимметрии
25	244,28	0,0543
50	549,82	0,0628
75	986,15	0,0412

По полученным графикам видно, что исследованные интервальные характеристики имеют пересечение, значит, по ним можно определить общую область значений параметров, соответствие которой может говорить об исправности состояния датчика.

2.3.2. Результаты расчета характеристик сигнала неисправных датчиков

В данном разделе приведены аналогичные оценки для неисправных модулей.

На рисунках 2.13 – 2.14 представлены оценки двух статистических параметров для пяти неисправных измерительных модулей (с 83%, 84%, 87%, 89%, 94% заполнением разделительной жидкости), соответствующие трем значениям входного давления – 100, 200 и 500 кПа.

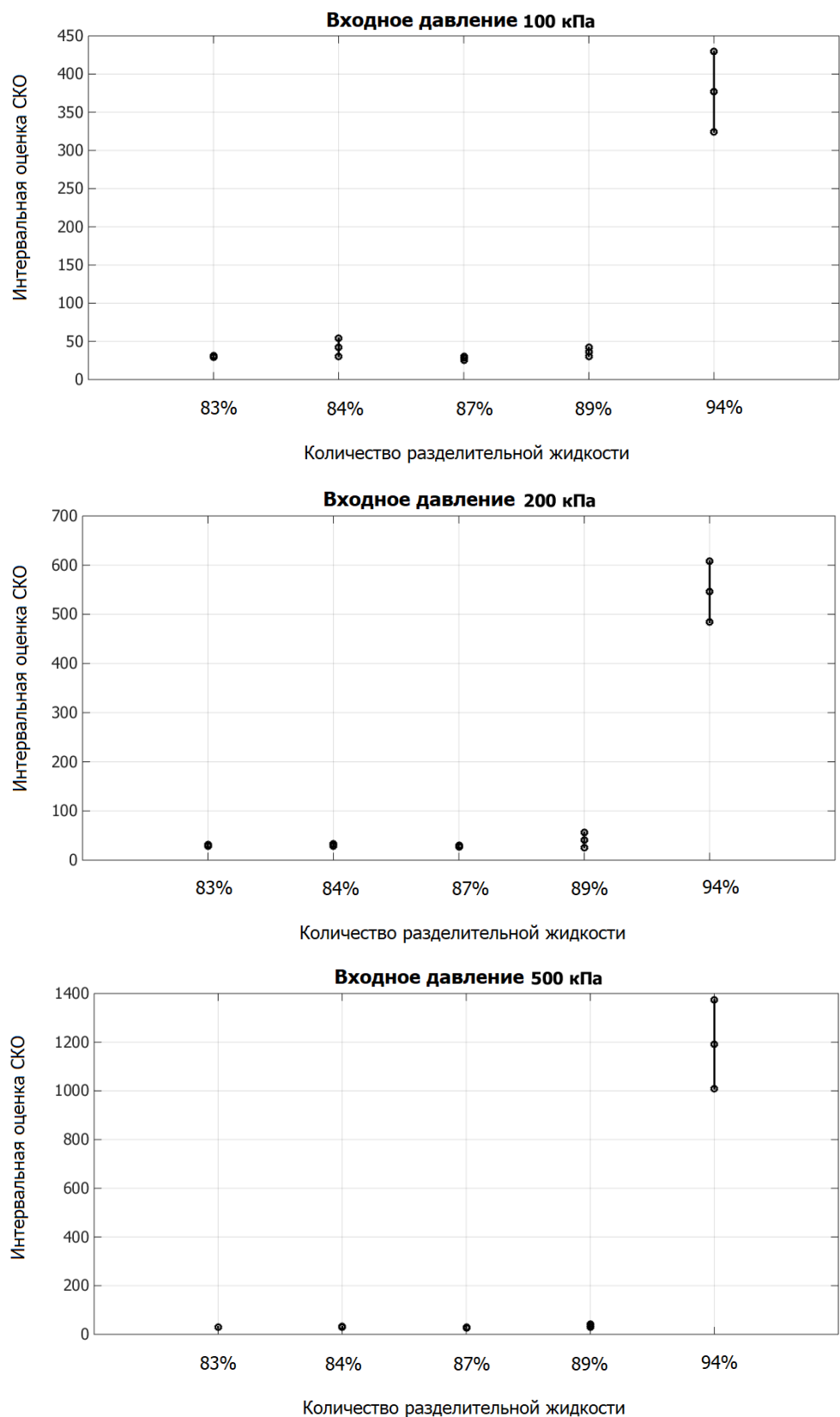


Рисунок 2.13 – Оценки СКО выходных сигналов неисправных модулей с 83%, 84%, 87%, 89%, 94% заполнением разделительной жидкости, соответствующие входным давлениям 100, 200 и 500 кПа

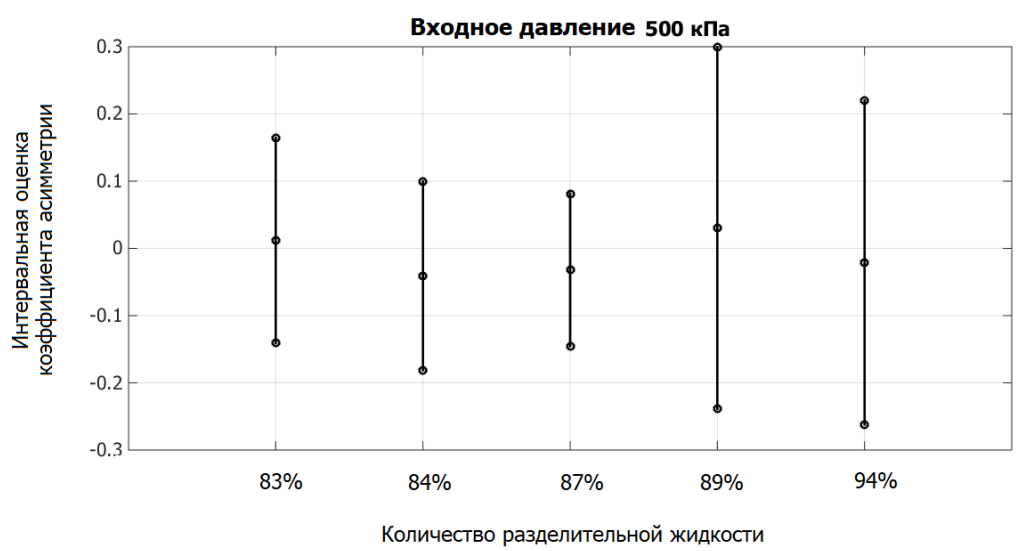
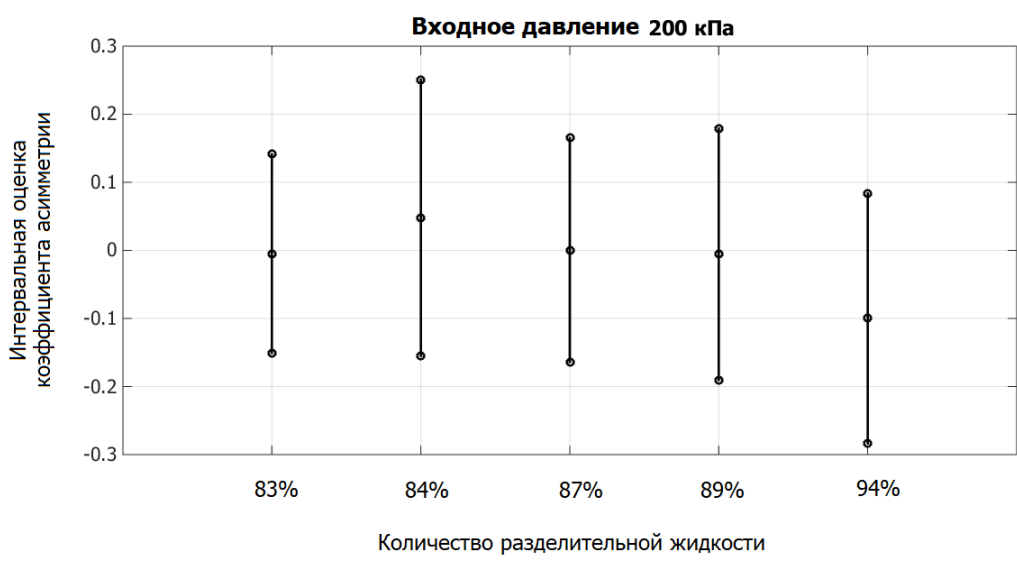
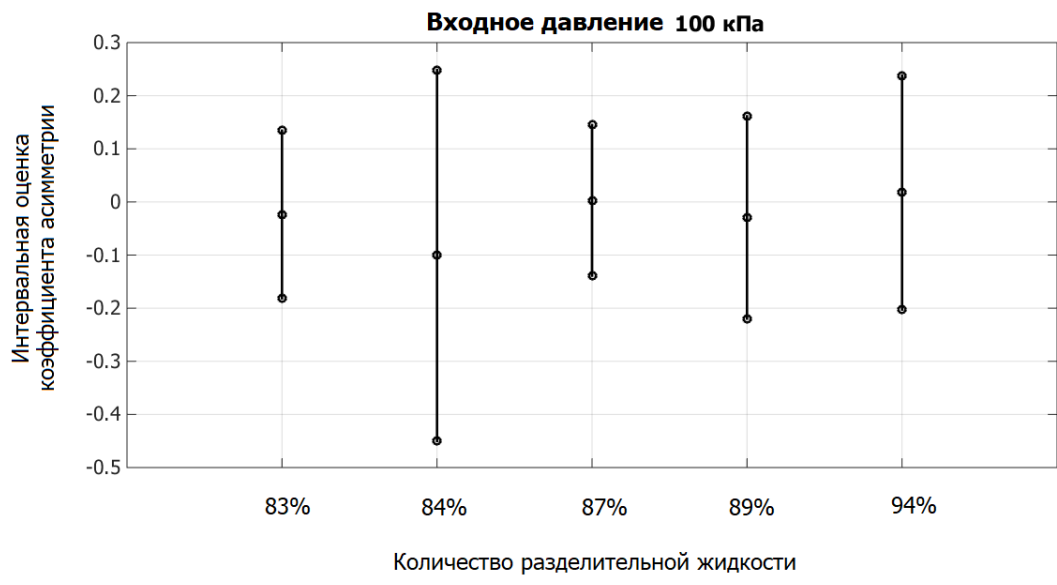


Рисунок 2.14 – Оценки коэффициента асимметрии выходных сигналов неисправных модулей с 83%, 84%, 87%, 89%, 94% заполнением разделительной жидкости, соответствующие входным давлениям 100, 200 и 500 кПа

В таблицах 2.4 и 2.5 представлены оценки для неисправных измерительных модулей с 83% и 94% заполнением разделительной жидкости соответственно.

Таблица 2.4 – Значения СКО и коэффициента асимметрии для неисправного измерительного модуля с 83% заполнением разделительной жидкости

Входное давление, кПа	СКО	Коэффициент асимметрии
100	29,95	-0,0237
200	30,25	-0,0047
500	29,05	0,0119

Таблица 2.5 – Значения СКО и коэффициента асимметрии для неисправного измерительного модуля с 94% заполнением разделительной жидкости

Входное давление, кПа	СКО	Коэффициент асимметрии
100	377,00	0,0178
200	546,14	-0,1000
500	1191,4	-0,0209

По полученным графикам можно сделать вывод, что интервальные оценки СКО для датчика с 94% заполнением разделительной жидкости существенно отличаются от оценок для неисправных модулей.

2.4. Сравнение статистических оценок

В данном разделе проводится сравнение статистических оценок для исправных и неисправных измерительных модулей.

На рисунках 2.15 – 2.16 представлены оценки двух статистических параметров для одного исправного и пяти неисправных измерительных модулей (с 83%, 84%, 87%, 89%, 94% заполнением разделительной жидкости), соответствующие трем значениям входного давления – 100, 200 и 500 кПа.

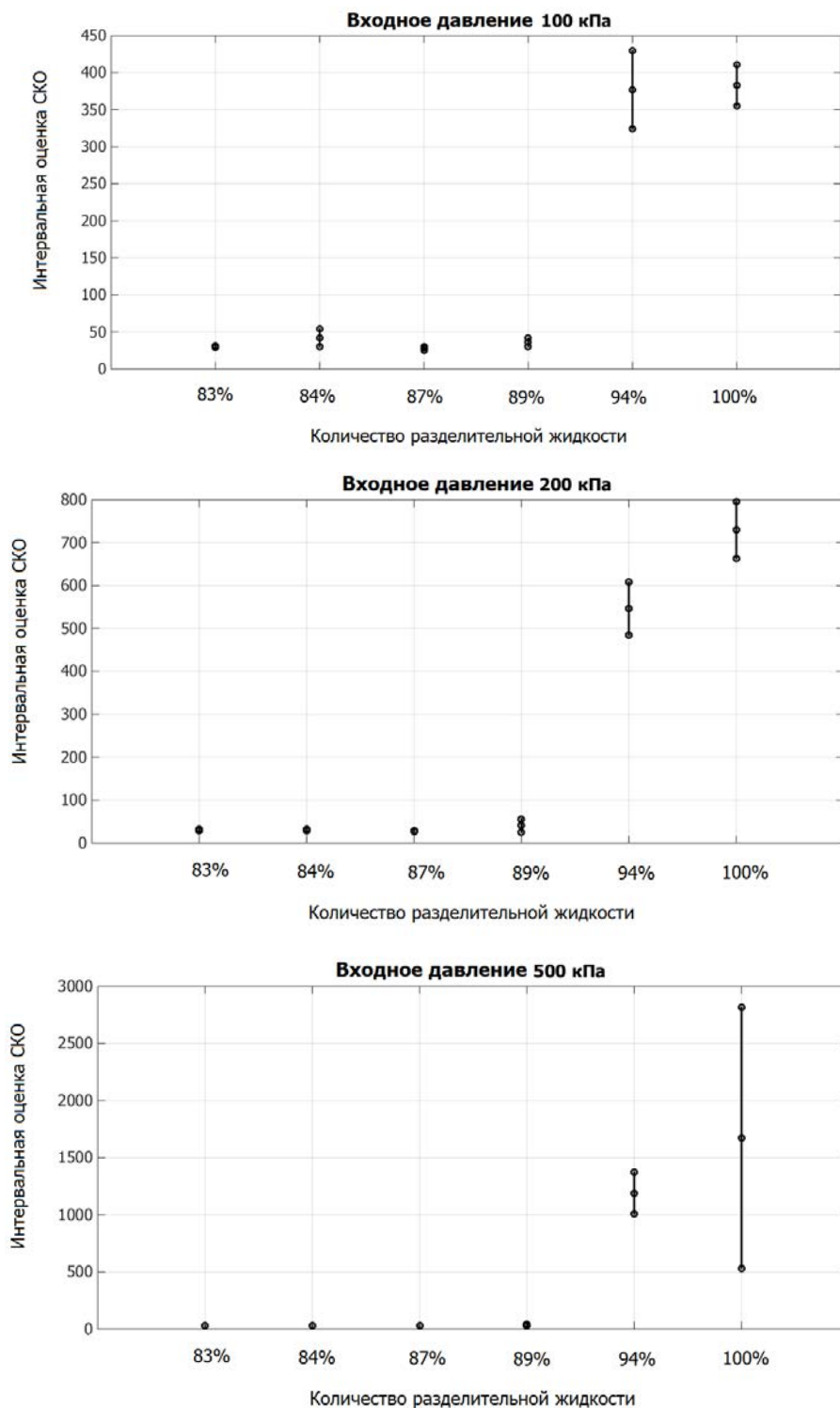


Рисунок 2.15 – Сравнение оценок СКО выходных сигналов исправных и неисправных модулей, соответствующие входным давлениям 100, 200 и 500 кПа

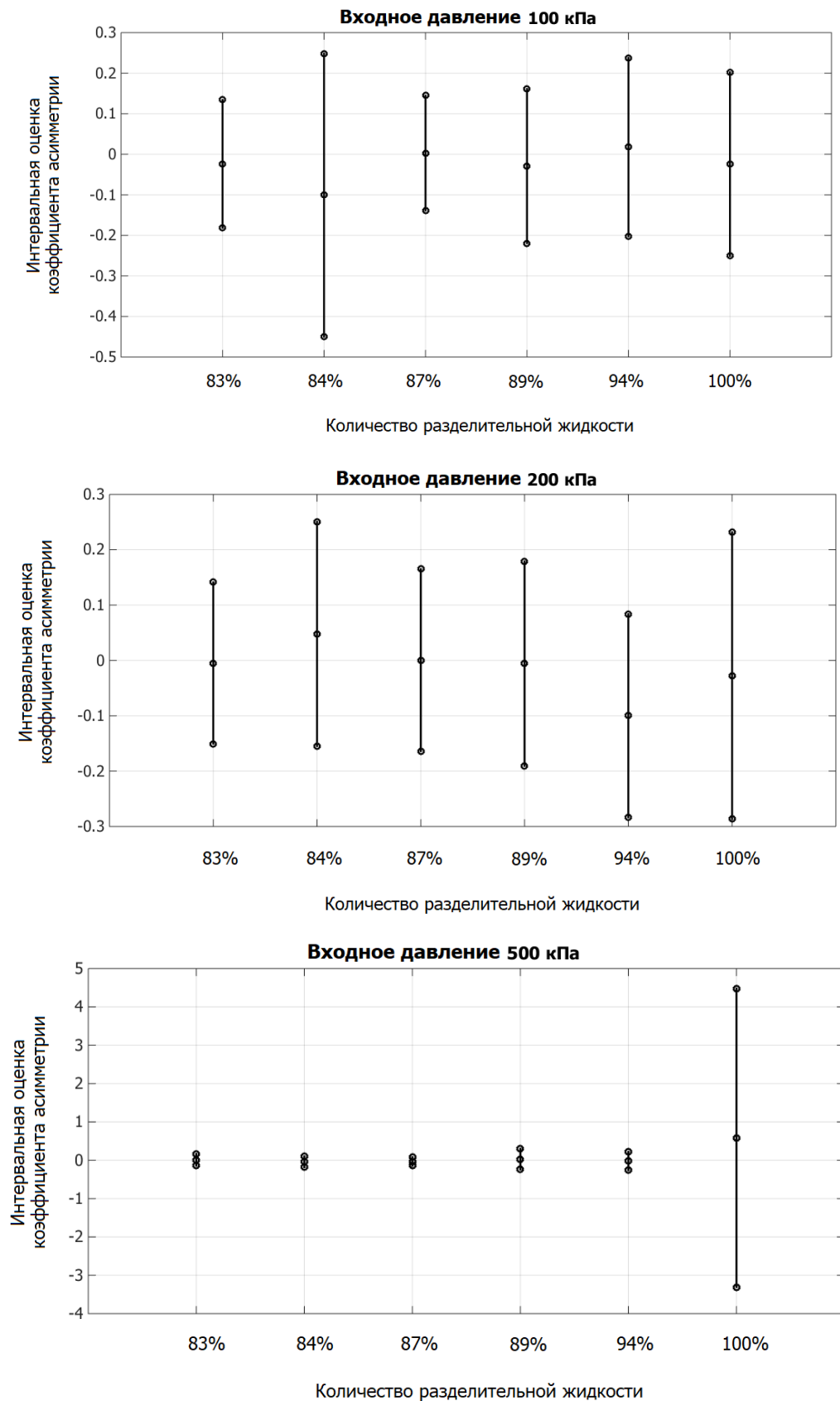


Рисунок 2.16 – Сравнение оценок коэффициента асимметрии выходных сигналов исправных и неисправных модулей, соответствующие входным давлениям 100, 200 и 500 кПа

Как видно из представленных графиков, наибольший интерес для диагностики рассмотренного типа неисправности представляет собой СКО выходного сигнала, поскольку при потере жидкости 11% и более СКО сигнала существенно снижается. На практике использование СКО в качестве признака неисправности должно учитывать зависимость его значения от входного давления.

2.5. Сравнение оценок спектра выходных сигналов

По частотному составу выходного сигнала можно получить информацию как о характере происходящих в измерительной системе процессов, так и о различных источниках этого сигнала, свидетельствующих о природе дефекта происходящего в измерительном приборе.

Чаще всего в качестве диагностического параметра используется спектр Фурье выходного сигнала датчика давления.

При помощи преобразования Фурье можно оценить частотный спектр сигнала, т.е. вклад каждой частоты в мощность исходного сигнала.

В данном разделе построены дискретные спектры сигнала, используя дискретное преобразование Фурье, с исправного и неисправных (с 83%, 84%, 87%, 89% и 94% заполнением разделительной жидкости) модулей при давлении 100 кПа. Частота дискретизации сигнала составляет 22 Гц.

На рисунках 2.17 – 2.22 представлены спектры выходного сигнала соответствующих модулей при подаче давления в 100 кПа.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						44
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

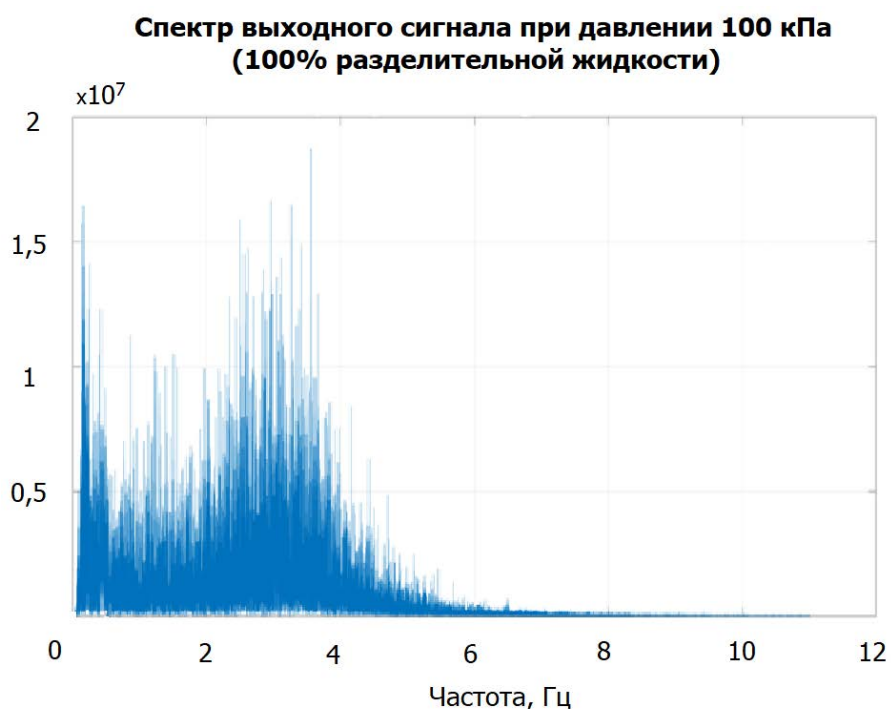


Рисунок 2.17 – Спектр выходного сигнала с исправного модуля
(100% разделительной жидкости)

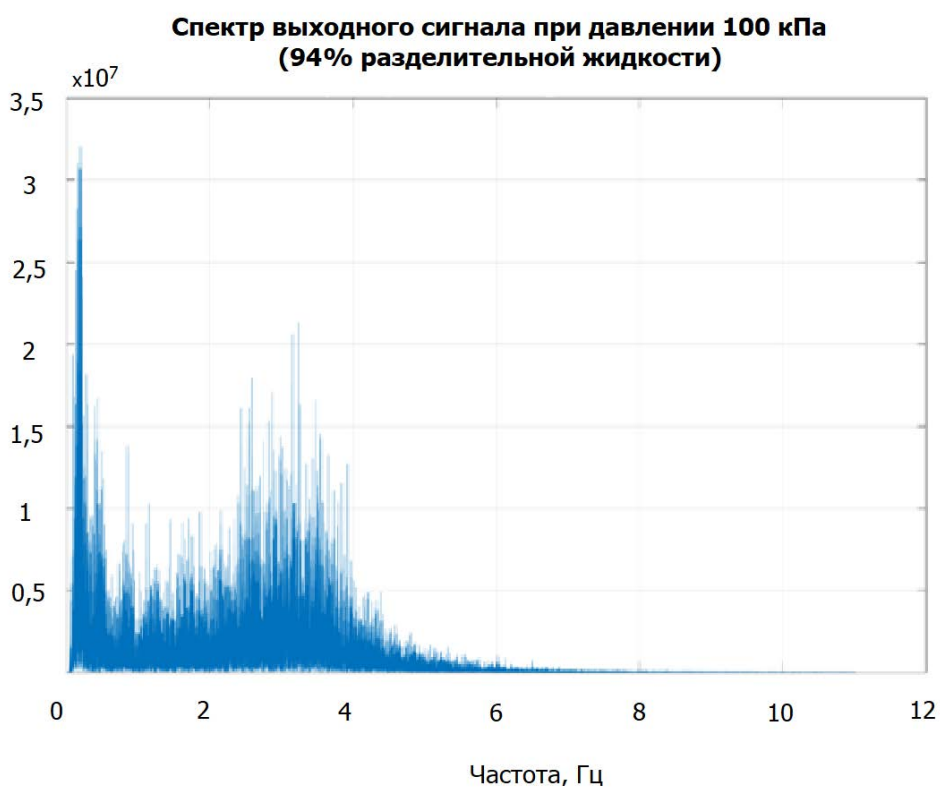


Рисунок 2.18 – Спектр выходного сигнала с неисправного модуля
(94% разделительной жидкости)

**Спектр выходного сигнала при давлении 100 кПа
(89% разделительной жидкости)**

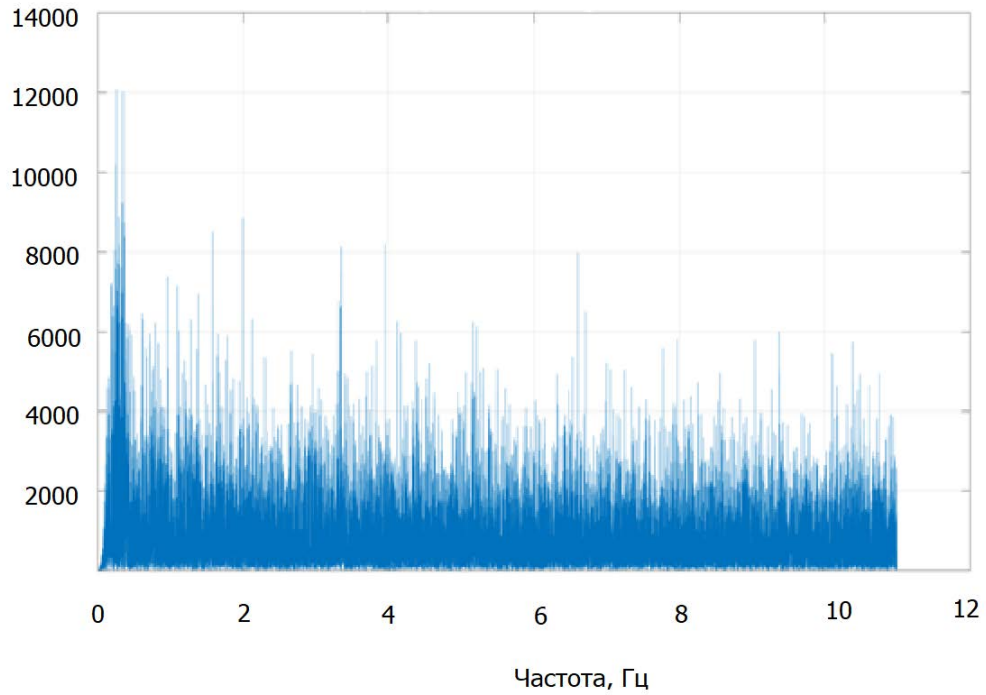


Рисунок 2.19 – Спектр выходного сигнала с неисправного модуля
(89% разделительной жидкости)

**Спектр выходного сигнала при давлении 100 кПа
(87% разделительной жидкости)**

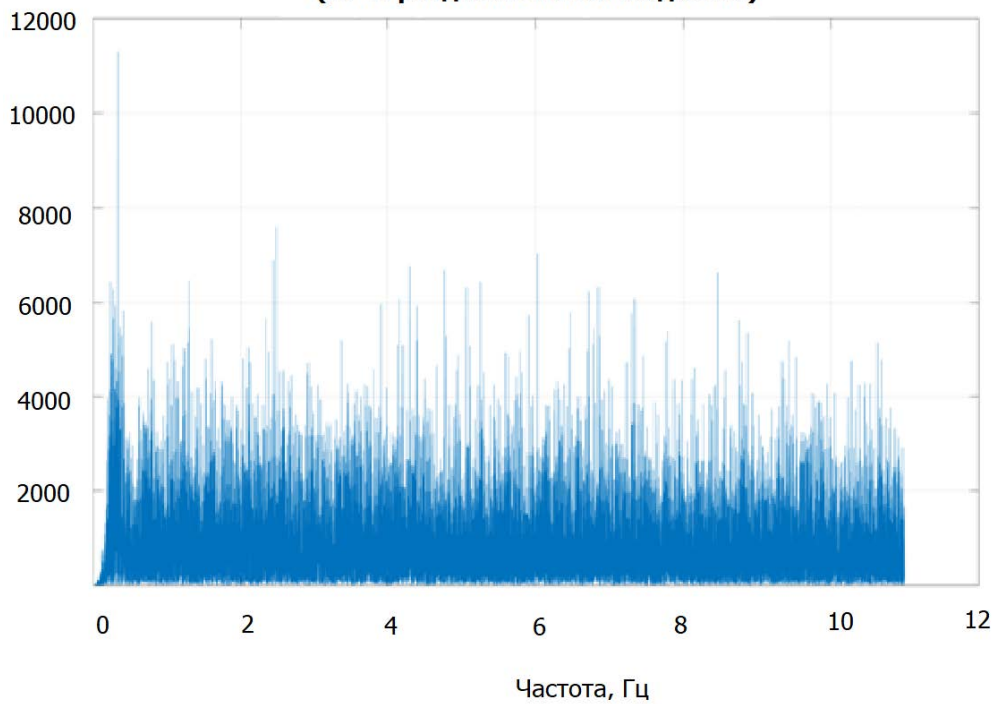


Рисунок 2.20 – Спектр выходного сигнала с неисправного модуля
(87% разделительной жидкости)

**Спектр выходного сигнала при давлении 100 кПа
(84% разделительной жидкости)**

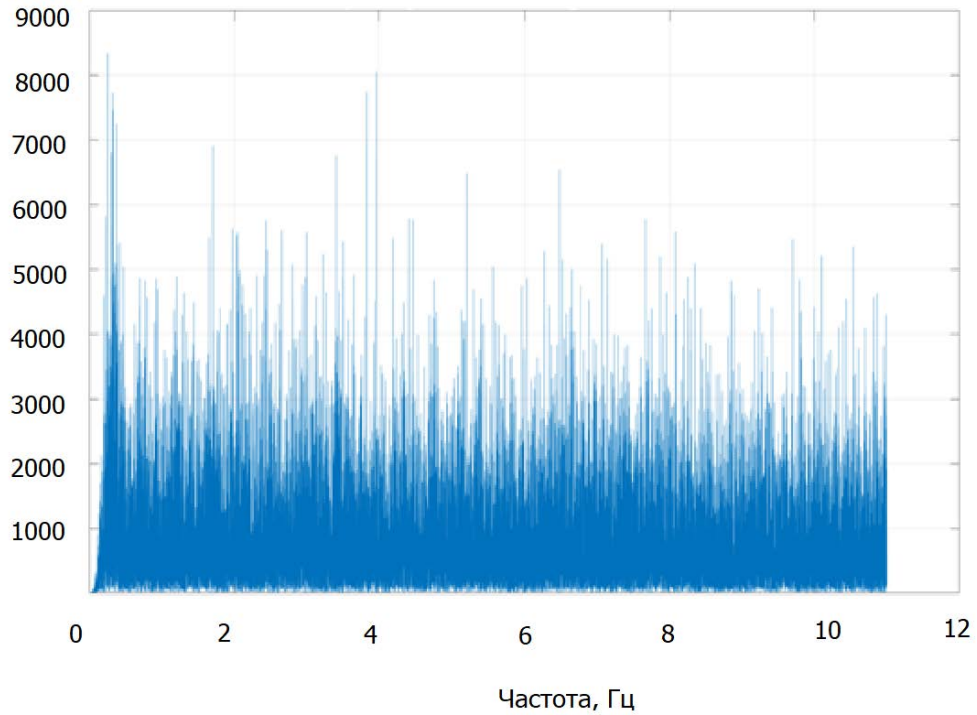


Рисунок 2.21 – Спектр выходного сигнала с неисправного модуля
(84% разделительной жидкости)

**Спектр выходного сигнала при давлении 100 кПа
(83% разделительной жидкости)**

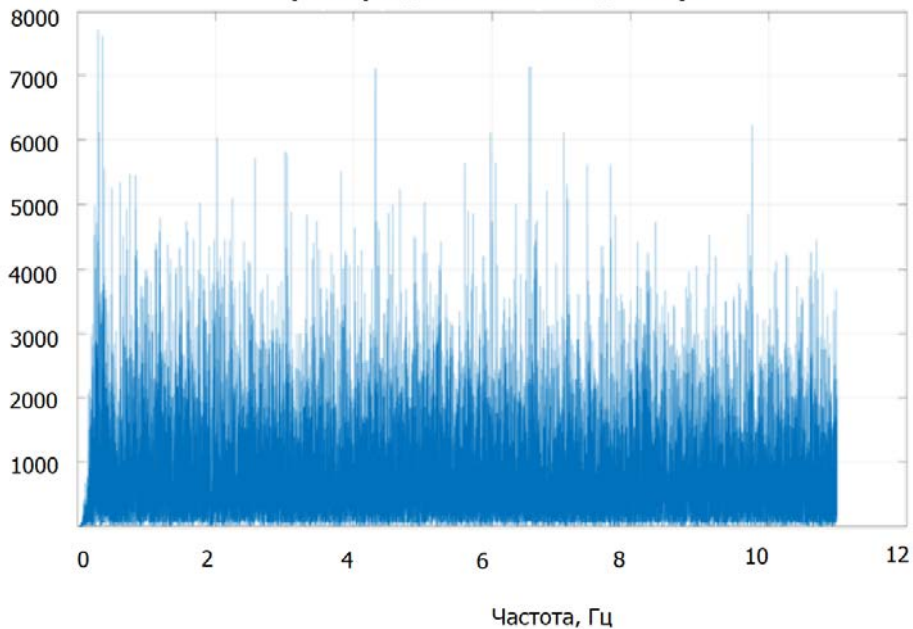


Рисунок 2.22 – Спектр выходного сигнала с неисправного модуля
(83% разделительной жидкости)

Стоит отметить, что спектры сигналов с исправного датчика и неисправного с 94% заполнением разделительной жидкости имеют схожую форму. Мощность в этих спектрах намного больше, чем мощность выходного сигнала неисправных датчиков с потерей жидкости 11% и более. Различия в частотном спектре выходного сигнала с исправных и неисправных датчиков заключаются в их разной степени неравномерности. Для исправного датчика (и датчика с 94% заполнением разделительной жидкости) до 6 Гц имеются явные пики, которые, скорее всего, связаны с входным сигналом.

Для неисправных датчиков наблюдается равномерный спектр, который похож на спектр белого шума.

Численно оценить спектральную мощность можно по следующей формуле [22]:

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^N F(\omega_i)^2},$$

где W – спектральная мощность;

$F(\omega_i)$ – значение амплитуды спектра на i -ой частоте;

ω_i – частота.

Т.к. спектр всегда положительный, оценим мощность по сумме отсчетов спектра, сведем в таблицу 2.6 значения мощности спектра в двух диапазонах от 0 до 5,5 Гц и от 5,5 Гц до 11 Гц.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						48
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Таблица 2.6 – Значения мощности спектра в диапазонах от 0 до 5,5 Гц и от 5,5 Гц до 11 Гц

Количество разделительной жидкости	P , кПа	$W_{0-5,5\text{Гц}}/W$	$W_{5,5-11\text{Гц}}/W$
100%	500	0,973	0,0265
	200	0,987	0,0123
	100	0,978	0,0216
94%	500	0,976	0,0234
	200	0,985	0,0142
	100	0,981	0,0182
89%	500	0,553	0,446
	200	0,536	0,463
	100	0,534	0,465
87%	500	0,527	0,472
	200	0,528	0,471
	100	0,528	0,471
84%	500	0,527	0,472
	200	0,524	0,475
	100	0,524	0,475
83%	500	0,523	0,476
	200	0,521	0,478
	100	0,523	0,476

Как видно из таблицы 2.6 мощность спектра, в диапазоне от 0 до 5,5 Гц при подаче давления на исправный датчик (и неисправный датчик с 94% заполнением разделительной жидкости) существенно больше, чем мощность спектра в диапазоне от 5,5 Гц до 11 Гц. При этом мощность спектра неисправных датчиков в «левом» и «правом» диапазонах примерно одинаковая.

По результатам анализа спектра выходного сигналов можно сделать вывод, что для исправных датчиков давления характер спектра имеет явно два выраженных пика. Неисправные модули имеют равномерный спектр, причем его общая мощность меньше, чем для исправных.

Полученные результаты не позволяют сделать однозначный вывод о применимости спектральных оценок для диагностики рассматриваемой неисправности и требуют дополнительного исследования.

Вывод по второму разделу: в данной главе был проведен анализ состояния датчика давления на основе его статистических и спектральных характеристик. В ходе исследования с помощью метода инверсий был выявлен и удален тренд в сигнале. Определена близость закона распределения рассматриваемого сигнала к нормальному закону распределения при помощи нормализованного критерия Колмогорова-Смирнова. Далее рассмотрены коды давления исправных и неисправных датчиков. Было выявлено, что при утечке жидкости 11% и более датчик перестает реагировать на входное давление, его характеристика становится нелинейной.

Помимо этого построены интервальные оценки СКО и коэффициента асимметрии для исправных и неисправных датчиков. Исходя из полученных результатов, в качестве диагностического параметра для обнаружения неисправности может служить СКО шума, т.к. при утечке жидкости 11% и более СКО существенно уменьшается.

Также построены спектральные характеристики выходного сигнала. Формы спектров для исправных и неисправных датчиков существенно отличаются.

По спектральным данным можно отметить, что спектр сигнала с исправных датчиков имеет два ярко выраженных пиковых значений. А для неисправных модулей спектр имеет равномерный характер.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						50
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

3.1. Обзор методов построения моделей

Использование моделей является распространенным способом исследования свойств явлений или объектов, поскольку позволяет экономить ресурсы, уточнить требования и условия для проведения физических экспериментов. Особенно большое значение это имеет в ситуации, когда манипуляции с реальным объектом невозможны или затруднены. Модель в самом общем виде можно представить как набор определенных правил для вычисления предсказываемых значений неких характеристик исследуемой системы или как образец (уменьшенная копия) исследуемой системы [23]. Моделирование основано на выделении, изучении и описании наиболее важных факторов и параметров, влияющих на свойства исследуемых объектов. Результатом моделирования, как правило, является создание модели объекта или системы и получение требуемой информации о данном объекте или системе.

В соответствии с ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения» [4], при разработке методов и средств диагностики технических объектов создается и анализируется диагностическая модель объекта диагностики. В основу такой модели закладываются условия эксплуатации объекта исследования, а также параметры его конструкции. Диагностическая модель представляет собой формализованное описание изучаемого объекта, которое необходимо для реализации методов диагностирования. Модель диагностики должна учитывать возможные изменения в исправном и неисправном состоянии объекта. По результатам исследования такой модели выявляются диагностические признаки и методы для их оценки, помимо этого разрабатывают алгоритмы диагностирования и определяют условия работоспособности, то есть создают диагностическое обеспечение.

Различают теоретические, эмпирические (физические) и теоретико-эмпирические модели и методы моделирования приборов и систем [23].

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						51
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Эмпирические методы моделирования предполагают исследование образца физического объекта или его уменьшенной копии. Выделяют следующие эмпирические методы: наблюдение, эксперимент, измерение и сравнение. Эмпирико-теоретические методы моделирования связаны с совместным исследованием физического объекта, его частей и их математических моделей. Примерами эмпирико-теоретических методов являются методы распознавания изображений, идентификации спектров, моделирования оптических спектров полупроводниковых структур на основе экспериментальных данных [23].

Теоретические методы моделирования и получения информации связаны с построением математических моделей. Математические модели могут быть общими и индивидуальными, аналитическими и матричными, детерминированными и недетерминированными (стохастическими), статическими и динамическими, непрерывными и дискретными. Особый интерес представляют динамические модели, которые имитируют динамику объекта во времени. Они могут быть как ограниченными по времени (протекающие за определенный промежуток времени), так и не ограниченными (предполагают бесконечность процесса во времени).

В данной работе построение модели необходимо для получения информации о процессах, происходящих в датчике при возникновении неисправности.

На первом этапе необходимо выдвинуть гипотезы, связанные с параметрами внутренней среды. Предположим, что при возникновении неисправности внутренняя область будет включать себя разделительную жидкость (Silicon DC 200 Industrial) и дополнительную среду, которая заполнит вытекший объем. Также не понятно, на входе или на выходе образуется «вторая» среда. Все это необходимо изучить в процессе моделирования.

Так как чаще всего утечка жидкости происходит из-за появления коррозии на одной из мембран, то вероятнее предположить, что образовавшийся объем при утечке жидкости заполнится воздухом извне. Поэтому под второй средой будем считать воздух с его нормальными параметрами.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						52
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

То есть в данной задаче рассматривается течение двухфазной среды в разделительном канале датчика, в научно-технической литературе такую среду также называют гетерогенной, т.е. смесь жидкости с твердыми частицами, с каплями другой жидкости, пузырьками газа или пара и т.д. Как правило, выделяют следующие режимы двухфазного течения: пенный, капельный, снарядный, пузырьковый.

Для решения задач гидрогазодинамики используют прикладной пакет ANSYS. Он позволяет рассматривать процессы, происходящие при ламинарных и турбулентных течениях жидкости, изучать свойства сжимаемых и несжимаемых потоков, моделировать течения гетерогенных и неньютоновских сред.

В ANSYS применяются два метода моделирования двухфазного течения [24]: модели Лагранжа и Эйлера. В Лагранжевой модели рассматривается движение отдельных частиц (или групп частиц) гетерогенной смеси. Модель Эйлера рассматривает изменение параметров (давление, температура, скорость движения) в различных точках пространства. В такой модели важную роль играют объемные доли изучаемого пространства, которые представляют собой объем, занимаемый каждой из фаз. Законы сохранения массы и импульса выполняются отдельно для каждой фазы.

Метод Эйлера использует модель VOF (Volume of Fluid – объем жидкости). В данной модели изучаемые фазы являются взаимопроникающими. Принцип работы VOF модели заключается в решении набора уравнений сохранения (массы, импульса) для каждой из фаз, также в уравнениях присутствуют специальные слагаемые для учета взаимодействия фаз между собой. Вид течения жидкости оказывает влияние на вид взаимодействия сред.

Процесс численного моделирования состоит из 5 основных частей:

1. Создание геометрической модели (CAD-модели) исследуемого объекта.

Для расчёта формируют расчетную геометрию объекта с заданными размерами. Среда ANSYS Fluent предусматривает возможность моделирования как в 2D

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						53
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

пространстве (двумерная постановка), так и в 3D пространстве (трехмерная постановка).

2. Создание сеточной модели расчётной зоны. На данном этапе происходит разбиение твёрдотельной модели, созданной на предыдущем этапе, на отдельные объёмы (маленькие ячейки). Процедура разбиения предусматривает использование определенного набора функций для подбора оптимальных размеров и формы ячеек.

3. Дополнение модели расчётными условиями. Здесь задаётся набор уравнений, которые требуется решить (для потоков жидкости по умолчанию задается уравнение неразрывности). Также в этом разделе указываются материалы сред, граничные условия, производится выбор расчета, настраивается точность решения.

4. Процесс решения. Процесс решения с помощью итерационных методов находит для каждого контрольного объёма такие значения параметров потока, при которых все уравнения выполняются с указанной точностью.

5. Представление результатов расчёта. В качестве результатов расчета получают массив данных (параметры процесса для каждой ячейки), который для визуализации может быть представлен в виде графиков, линий тока, контуров или векторов распределения параметров, числовых значений.

В данной работе необходимо построить упрощенную модель механико-гидравлической системы тензометрического датчика давления. На ее основе провести исследование процессов, происходящих в канале в исправном (гомогенная среда) и неисправном состоянии (гетерогенная смесь), получить контуры давлений для исправного и неисправного состояний, построить зависимости по полученным численным значениям, провести аналогию с экспериментальными данными.

3.2. Моделирование исправного состояния

Для моделирования воспользуемся блоком Fluid Flow (Fluent) прикладного пакета ANSYS.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						54
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

Во вкладке Geometry создадим расчетную геометрию с помощью процессора Design Modeler. Задача решается в двумерном пространстве для уменьшения времени расчета. Область течения разделительной жидкости в упрощенном виде представляет собой цилиндрический канал (в сечении прямоугольник) с длиной $L = 32$ мм и диаметром $D = 0,56$ мм.

С помощью стандартных элементов построим расчетную область (Рисунок 3.1).

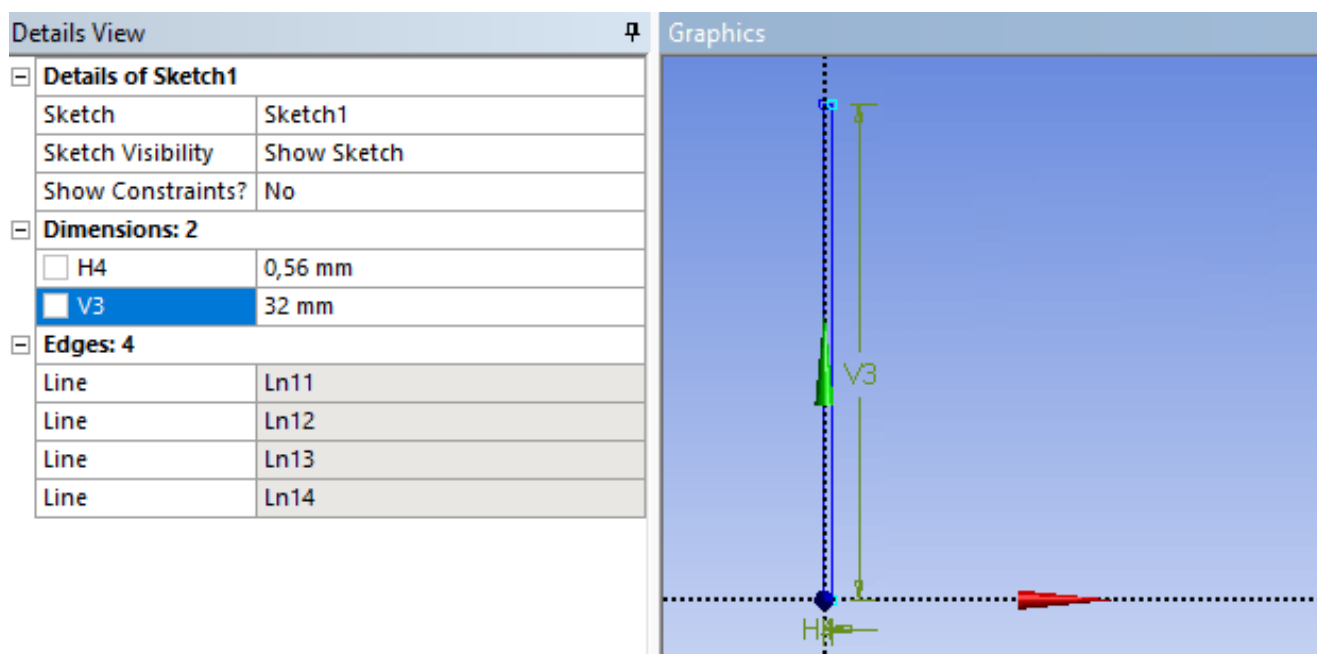
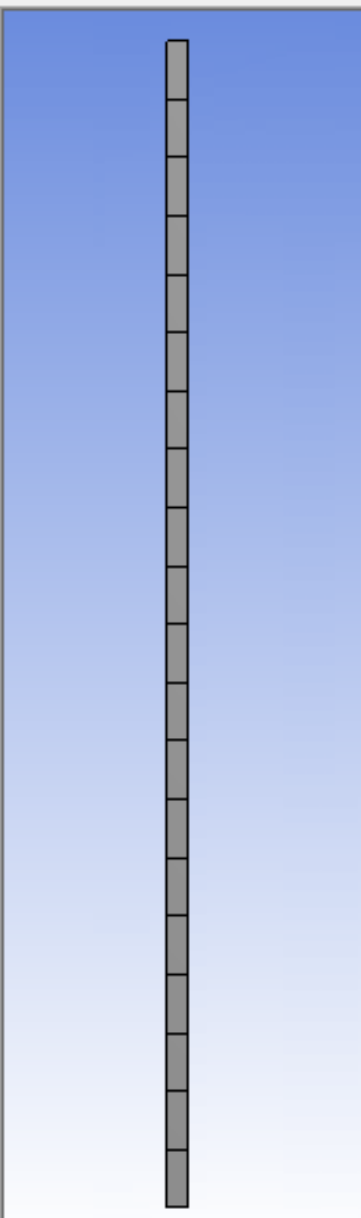


Рисунок 3.1 – Расчетная геометрия

Далее необходимо создать расчетную сетку. Сетка, созданная автоматически (Рисунок 3.2) не является подходящей для задач гидрогазодинамики, поэтому воспользуемся встроенными функциями для повышения точности сетки.

Outline		♀
Details of "Mesh"		♀
Physics Preference	CFD	^
Solver Preference	Fluent	
<input type="checkbox"/> Relevance	0	
Export Format	Standard	
Shape Checking	CFD	
Target Skewness	Program Controlled	
Element Midside Nodes	Dropped	
[-] Sizing		
Size Function	Curvature	
Relevance Center	Coarse	
Initial Size Seed	Active Assembly	
Smoothing	Medium	
Span Angle Center	Fine	
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)	
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (1,5952e-002 mm)	
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (1,59520 mm)	
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)	
Automatic Mesh Based Defeaturing	On	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (7,9762e-003 mm)	
Minimum Edge Length	0,560 mm	
[+] Inflation		
[+] Assembly Meshing		
[+] Advanced		
[-] Statistics		
<input type="checkbox"/> Nodes	42	
<input type="checkbox"/> Elements	20	
Mesh Metric	None	



Geometry Print Preview

Рисунок 3.2 – Параметры автоматически созданной сетки

Далее с помощью функции Sizing Control установим размеры ячеек в пограничном слое (Рисунок 3.3).

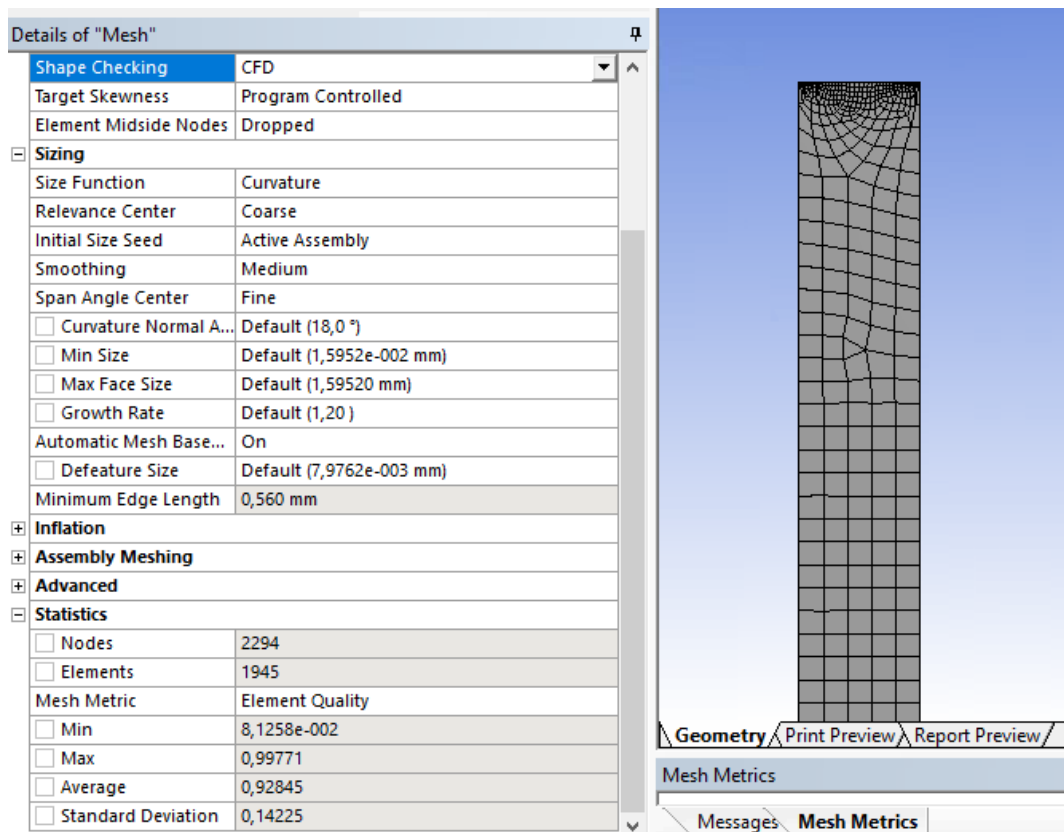


Рисунок 3.3 – Изменение размера ячеек в пограничном слое с помощью функции Sizing Control

Видно, что получившаяся сетка имеет различную форму элементов (Рисунок 3.4):

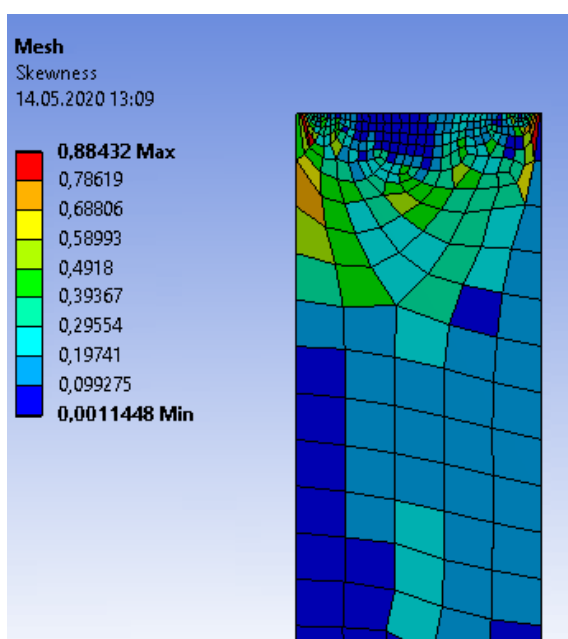


Рисунок 3.4 – Несимметричность элементов сетки

Для упорядочения элементов воспользуемся функцией Face Meshing. Параметры получившейся расчетной сетки представлены на рисунке 3.6:

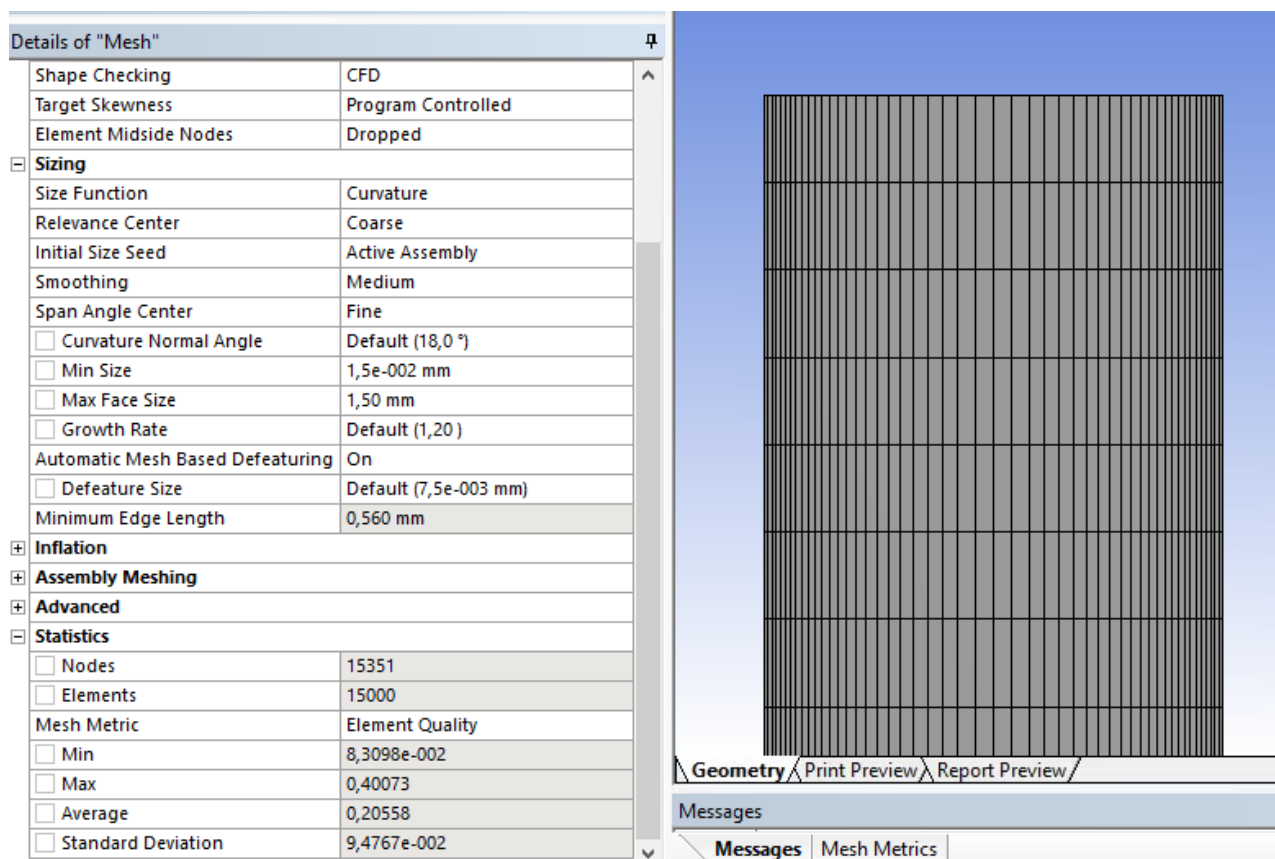


Рисунок 3.6 – Расчетная сетка и ее основные параметры

Расчетная сетка содержит 15000 элементов, максимальный размер элемента 1,5 мм, минимальный $1,5 \cdot 10^{-2}$ мм.

Далее необходимо задать условия расчета в пункте меню Setup. Расчет проводится по давлению, поэтому необходимо выбрать тип решателя «Pressure-Based». В разделе «Models» выберем тип уравнений k-epsilon второго порядка.

В «Materials» задаем свойства основной жидкости (плотность – 1000 кг/м³, вязкость – 0,02 Па с) [25].

Помимо этого необходимо задать граничные условия в пункте «Boundary Conditions». Входное давление (от 100 кПа до 500 кПа) для области Inlet (вход),

стенка гладкая, без проскальзывания и прилипания «No Slip», давление на области Outlet (выход) 0 Па.

В постпроцессоре «CFD-Post» по полученным результатам построим контур давления в плоскости сечения канала (Рисунок 3.7).

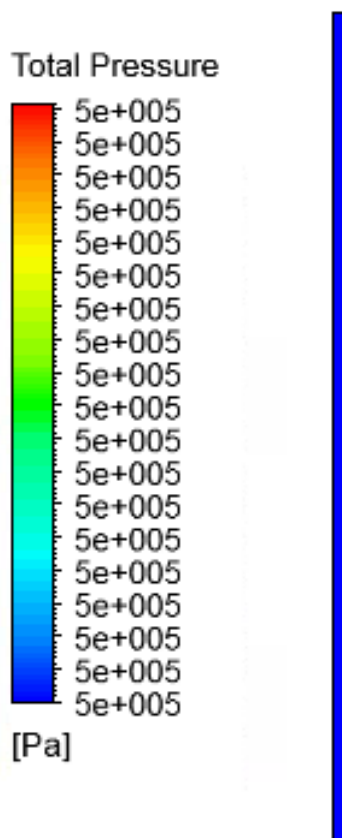


Рисунок 3.7 – Контур давления для входного давления 500 кПа

По полученному контуру видно, что входное давление равно давлению на выходе, что соответствует исправному состоянию датчика. Далее рассмотрим неисправное состояние датчика с воздухом на выходе.

3.3. Моделирование неисправного состояния

Для моделирования неисправного состояния воспользуемся геометрией и расчетной сеткой из п.3.1. Внесем изменения в параметры решателя. В пункте «Multiphase» выберем модель VOF, которая позволяет исследовать динамику гетерогенной смеси.

В качестве дополнительной фазы (Secondary Phase) создадим вещество Silicon-liquid (т.к. в дальнейшем необходимо будет задать процентное соотношение фаз) с параметрами Silicon DC 200 Industrial (Рисунок 3.8):

Рисунок 3.8 – Параметры основной фазы

В качестве основной фазы (Primary Phase) выберем из библиотеки стандартных материалов воздух с его нормальными параметрами. Также необходимо указать коэффициент поверхностного натяжения разделительной жидкости, который равен 21,2 мН/м [25].

Граничные условия оставим теми же. В пункте «Mark Cells» установим границы разделения фаз (Рисунок 3.9).

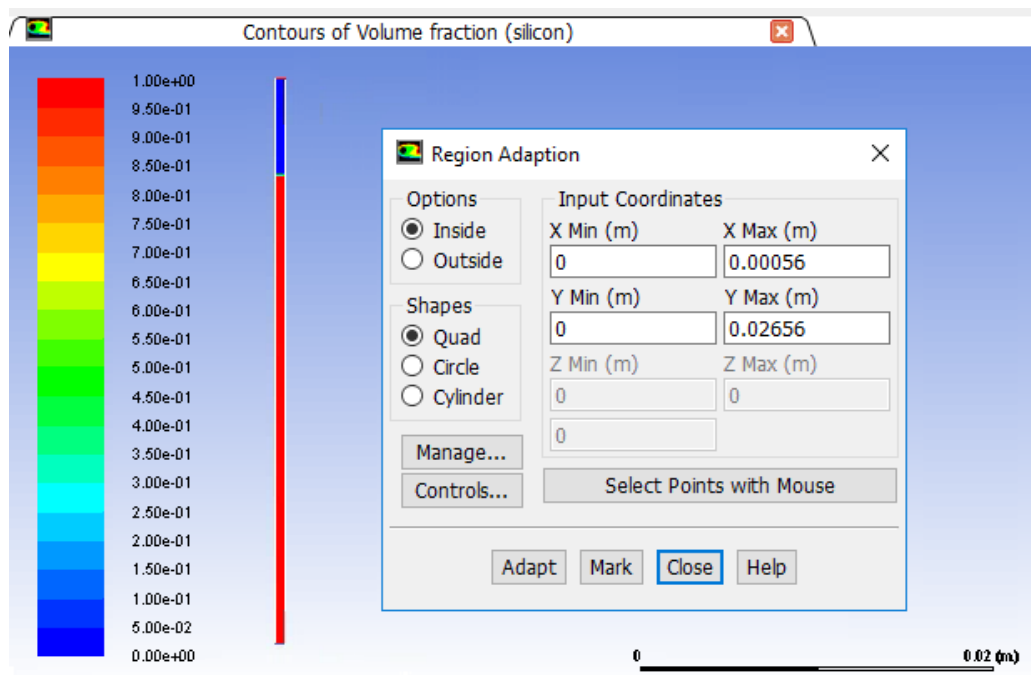


Рисунок 3.9 – Параметры настройки разделения фаз:
 красный – разделительная жидкость (83%), синий – воздух (17%)

После схождения расчета получим контур давления (Рисунок 3.10):

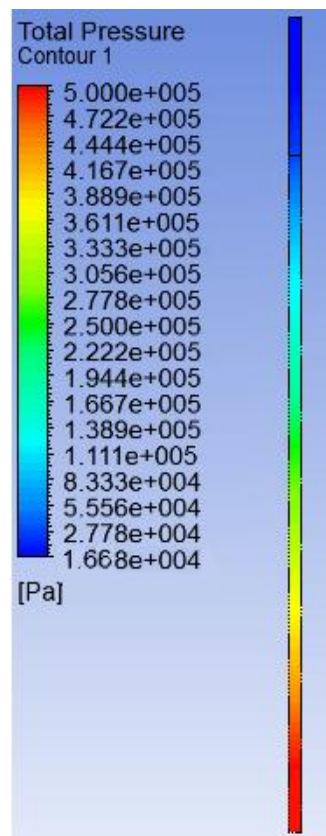


Рисунок 3.10 – Контур давления в неисправном состоянии (17% потери жидкости)

Отметим контрольные точки давления на входе (Рисунок 3.11) и на выходе (Рисунок 3.12) разделительного канала.

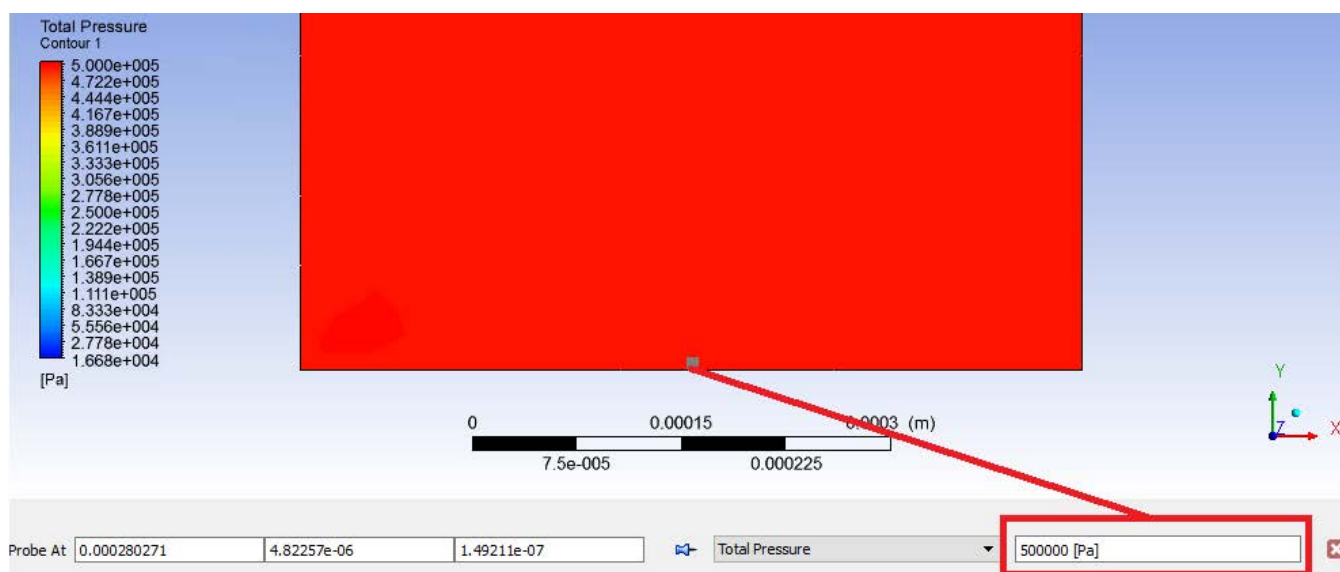


Рисунок 3.11 – Значение давления на входе

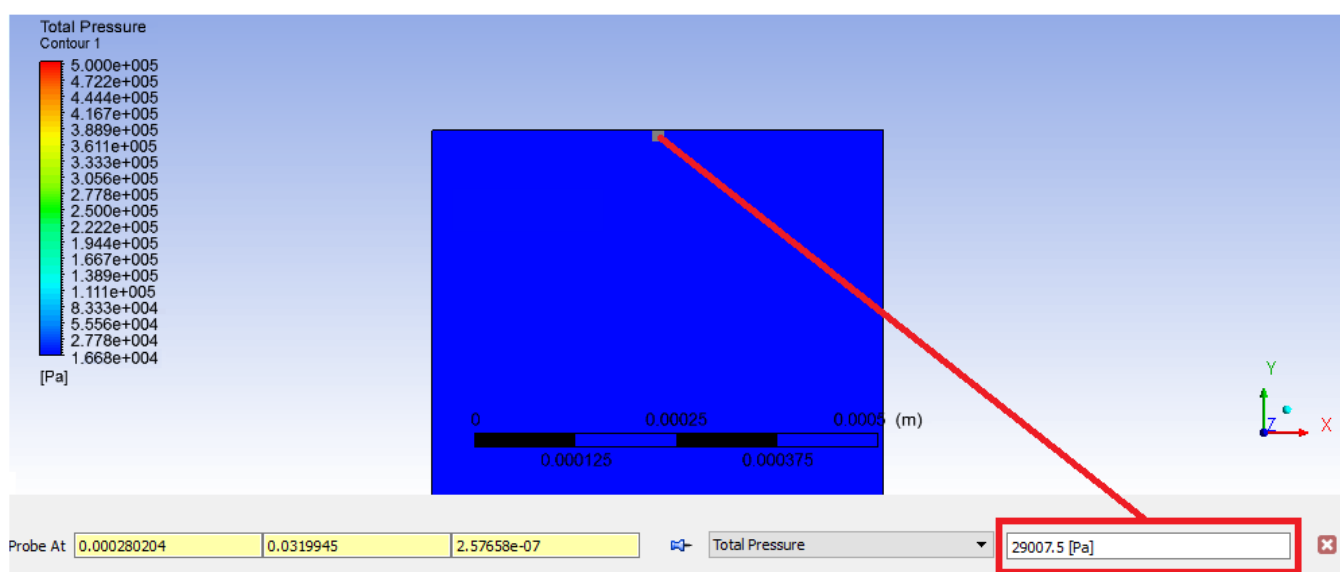


Рисунок 3.12 – Значение давления на выходе

Из полученных контуров видно, что при входном давлении 500 кПа на выходе давление составляет примерно 29 кПа при потере жидкости 17%. Проанализируем случаи с различным количеством разделительной жидкости при входном давлении от 100 кПа до 500 кПа, полученные результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные при моделировании неисправного состояния с воздухом на выходе канала

Входное давление, кПа / Количество разделительной жидкости	94%	89%	87%	84%	83%
100	99985	99987	96784	31017	30897
200	200026	179168	110491	41421	30976
300	300066	179203	112722	39998	31002
400	399999	163001	108742	41246	29903
500	499982	120973	91489	31191	29008

По полученным данным построим зависимость выходного давления от входного (Рисунок 3.13).

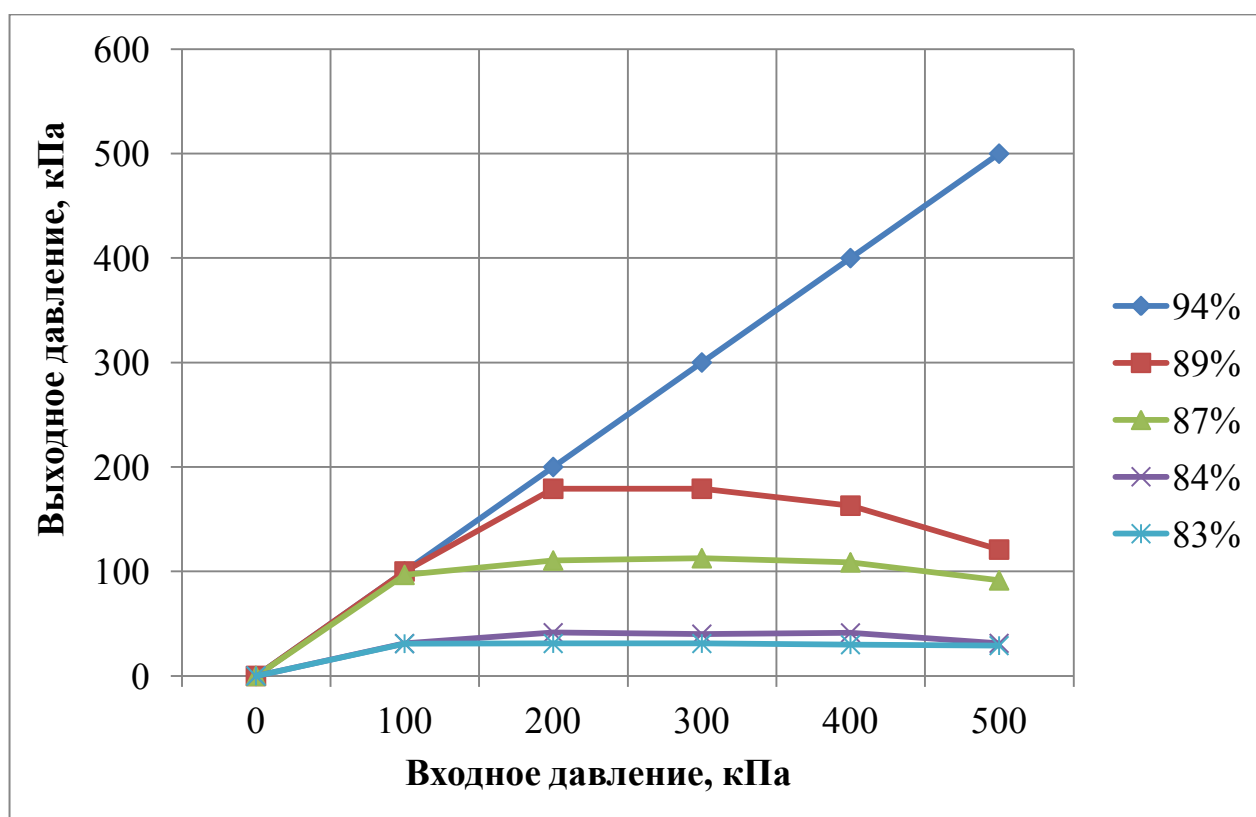


Рисунок 3.7 – Зависимость выходного давления от входного в неисправном состоянии

Из графика видно, что при потере жидкости 6% характеристика датчика еще является линейной (как для исправного датчика). При потере жидкости 11% и более характеристика становится явно нелинейной.

Полученная зависимость (Рисунок 3.7) качественно схожа с полученной ранее экспериментальной зависимостью (см. Рисунок 2.10).

Вывод по третьему разделу: в данной главе рассмотрены основные способы построения моделей. В качестве инструмента для исследования выбран прикладной пакет ANSYS, в котором проведено моделирование исправного и неисправного состояния датчика давления, в качестве исследуемого элемента был выбран канал с разделительной жидкостью. В ходе моделирования получены контуры распределения фаз и давлений. По полученным данным построена статическая характеристика давления. Полученные численные значения отличаются от ранее рассмотренных экспериментальных данных, но вид характеристики сохранился, что можно объяснить тем, что при моделировании использовалась упрощенная, а не детализированная модель измерительного преобразователя.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						64
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

диагностического параметра состояния датчика давления. Данное значение можно использовать в системах мониторинга состояния датчиков давления.

Но такие системы будут иметь ряд ограничений. Главное условие применимости метода технической диагностики датчика давления на основе анализа шума – это наличие технологического шума достаточного уровня мощности в технологическом процессе, частью которого является диагностируемый датчик давления. Несмотря на то, что в реальном технологическом процессе это условие, как правило, выполняется, существенное влияние на алгоритм диагностики могут оказывать характеристики шума, которые в общем случае неизвестны.

На возможность диагностики также влияет сам характер технологического процесса. В качестве диагностического параметра СКО не подойдет, если в процессе будет нулевое избыточное давление или будут происходить быстроменяющиеся во времени процессы. Преодолеть данное ограничение можно, если использовать дополнительные источники информации о технологическом процессе, в том числе данные с других датчиков (давления, расхода и т.д.), установленных для контроля процесса.

Также существенным ограничением является необходимый уровень развития неисправности. Для отказов, связанных с утечкой разделительной жидкости, таким параметром является процент вытекания жидкости из разделительного канала. По результатам исследования можно утверждать, что процент вытекания должен быть достаточным (превышать 10-11%), чтобы значение СКО выходного сигнала изменилось настолько, чтобы его можно было обнаружить.

Предлагаемый алгоритм диагностики технического состояния датчика основан на вычислении СКО кодов АЦП в процессе работы датчика и сравнении его с опорным значением, которое может быть либо заранее задано при калибровке датчика, либо установлено при начале использования датчика в технологическом процессе.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						66
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Алгоритм статистического мониторинга процесса (Statistical Process Monitoring) в режиме «Наблюдение» непрерывно вычисляет среднее значение и СКО сигнала. Тревожный сигнал срабатывает, если существенно снижается СКО при неизменном среднем значении. В случае если произошла неисправность датчика, связанная с его механико-гидравлической системой, то произойдет отказ в правильном отображении значения давления, поэтому условие постоянства среднего значения не будет выполнено. Соответственно, для реализации функции диагностики датчиком собственного состояния необходима коррекция алгоритма с учетом знания о характере проявления неисправностей датчика в его выходном сигнале.

Учитывая рассмотренные ограничения, можно предложить практическую реализацию системы контроля над состоянием датчиков давления на участке трубы с помощью показаний двух датчиков и значений СКО шума выходного сигнала. Схема практической реализации данного алгоритма представлена на рисунке 4.1.

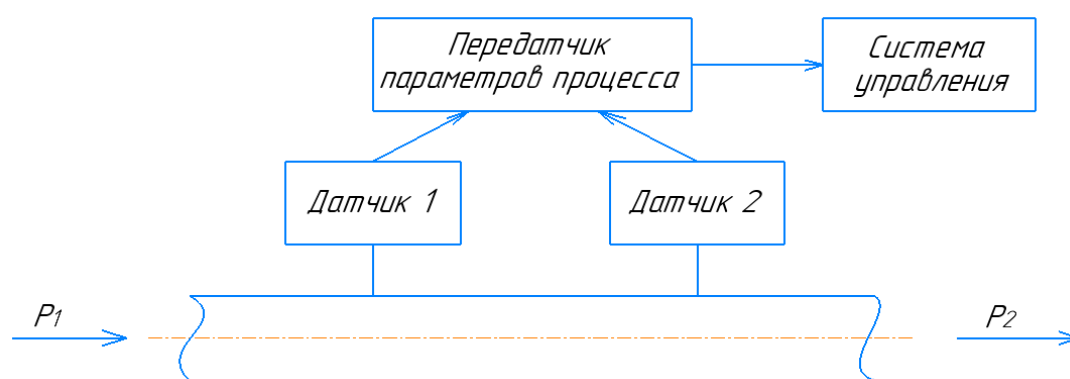


Рисунок 4.1 – Схема системы контроля и мониторинга состояния датчиков давления

Схема состоит из участка трубы с параметрами потока P_1 – давление потока на входе трубы, P_2 – давление потока на выходе из трубы, двух датчиков давления и передатчика переменных процесса, который отправляет данные в систему управления.

На рисунке 4.2 представлена блок-схема реализации метода.

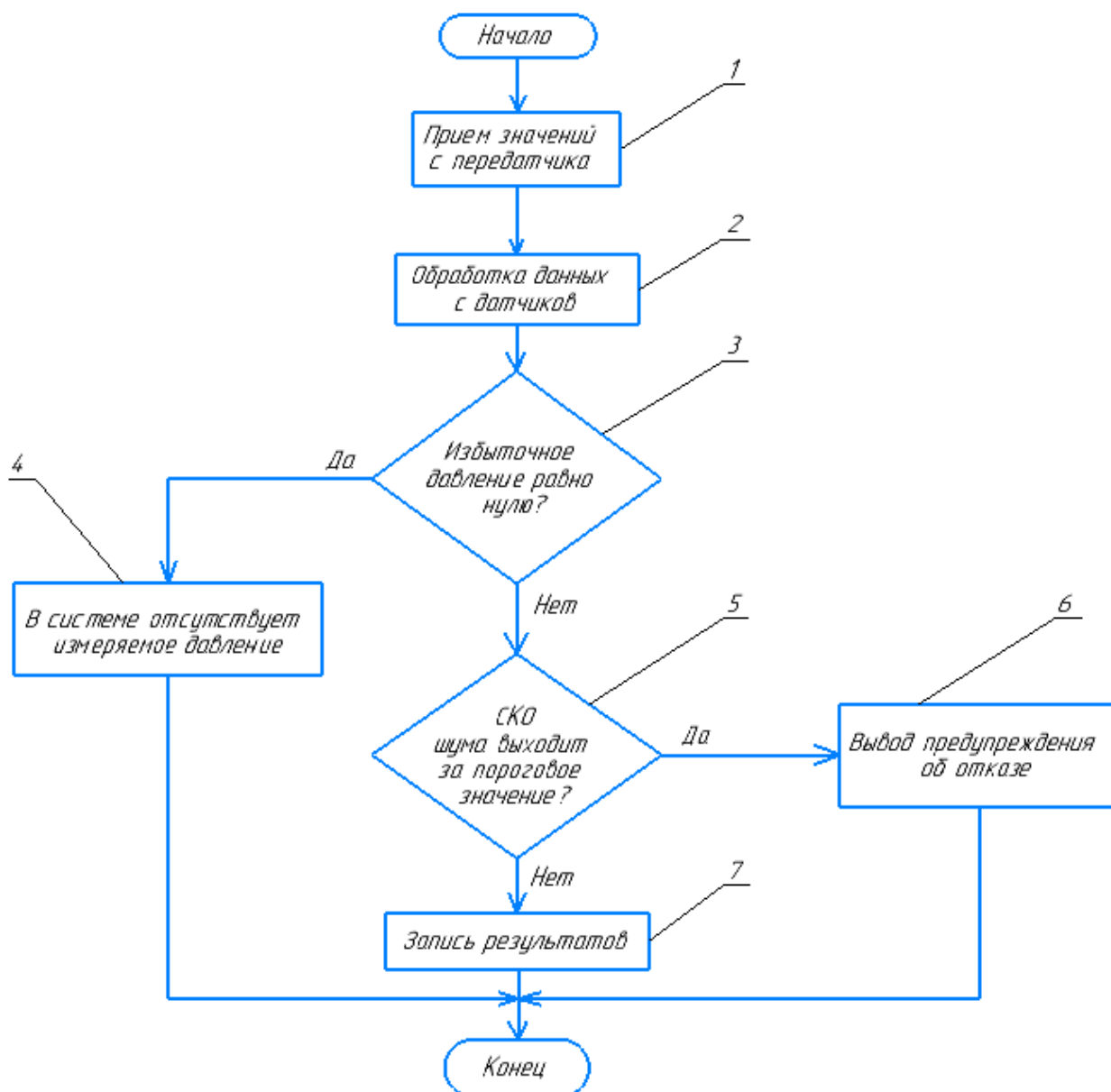


Рисунок 4.2 – Блок-схема реализации метода

Алгоритм диагностики, представленный на рисунке 4.2, включает в себя последовательный набор действий. В блоке 1 осуществляется получение данных о процессе и переменных с датчиков давления. Далее в блоке 2 осуществляется основная обработка полученных данных, которая позволяет проверить ряд ограничений метода (блок 3), а также рассчитать контрольные значения СКО, по которым можно сделать вывод об исправности датчика. Так в блоке 5

осуществляется сравнение рассчитанного значения СКО с опорным значением, которое может быть либо заранее задано при калибровке датчика, либо установлено при начале использования датчика в технологическом процессе. Завершающим этапом алгоритма является блок 7, который формирует необходимую информацию для вывода результатов измерения.

4.2. Проект программы испытаний датчиков для продолжения исследований

Рассмотренный метод диагностики предполагает возможность использования информации, содержащейся в выходном сигнале модуля давления без изменения механической части датчика. Для реализации диагностического алгоритма требуется внесение соответствующих изменений в электронную часть и программное обеспечение датчика.

Для того чтобы достоверно определить состояние датчика необходимо контролировать дополнительные параметры, в качестве которых могут быть использованы параметры, характеризующие время реакции на изменение входного давления или параметры, связанные со спектром сигнала.

Перед тем, как использовать алгоритм, отраженный в блок схеме на рисунке 4.2, необходимо обосновать его работоспособность в ходе испытаний, которые бы в полной мере отражали реальные условия эксплуатации датчиков.

Для проведения такого рода испытаний должна быть разработана «Программа и методика испытаний» в соответствии с ГОСТ 19.301-79 ЕСПД [29]. Программа и методика испытаний предназначена для выявления технических данных, которые должны быть подвергнуты проверке в ходе испытаний средства измерения. Помимо этого, она должна содержать в себе методы контроля испытаний и порядок их проведения.

Также «Программа и методика испытаний» в процессе опытного функционирования применяется для поиска данных, подтверждающих полученные ранее проектные решения по обнаружению сбоев измерительного преобразователя.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	<i>Лист</i>
						69
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Программа испытаний содержит разделы [29]:

- 1) объект испытаний;
- 2) цель испытаний;
- 3) общие положения;
- 4) объем испытаний;
- 5) условия и порядок проведения испытаний;
- 6) материально-техническое обеспечение испытаний;
- 7) отчетность.

Объект испытаний

В данном разделе указывается наименование, обозначение, а также область применения программы испытаний. Данные сведения должны быть заимствованы из разделов технического задания (ТЗ).

Т.к. в данной работе в качестве исследуемого образца был использован модуль давления Метран-150, то разрабатываемая методика испытаний будет приведена именно для этого объекта исследования.

Наименование темы разработки «Система диагностики технического состояния датчика деления». Данная программа предназначена к применению в профильных подразделениях на объектах заказчика.

В качестве исследуемого образца используется: Модуль Метран-150 TG2, [заводские номера] – [количество штук].

Цель испытаний

Цель испытаний: определение качественных характеристик объекта исследования, при анализе его выходного сигнала, при возмущающем факторе (температура и давления).

Общие положения

В разделе "Общие положения" указывают:

- 1) основания для проведения испытаний
- 2) место и продолжительность испытаний;
- 3) организации, участвующие в испытаниях;

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						70
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

4) перечень предъявляемых на испытания документов.

Испытания проводятся на основании договора между предприятием-заказчиком и научно лабораторией университета.

В качестве места проведения испытаний может быть выбрана научно-исследовательская лаборатории технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем ауд. 003/3а ЮУрГУ при наличии оборудования, позволяющего проводить испытания с контролируемым (известным) шумом на входе для изучения влияния уровня и характеристик шума процесса на выходной сигнал исправных и неисправных датчиков. В перспективе возможно использование тестовых воздействий для исследования признаков неисправностей.

В качестве нормативных документов могут быть применены:

- 1) ГОСТ 19.301-79 ЕСПД. Программа и методика испытаний;
- 2) ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции;
- 3) МИ 3290-2010 ГСИ. Рекомендация по подготовке, оформлению и рассмотрению материалов испытаний средств измерений в целях утверждения типа.

Состав программной документации должен включать в себя:

- 1) техническое задание;
- 2) программу и методику испытаний;
- 3) руководство системного программиста;
- 4) руководство оператора;
- 5) ведомость эксплуатационных документов.

Объем испытаний

Испытания состоят из следующих основных этапов:

1. Ознакомление лицами проводящих испытания методики калибровки средств измерений. Ознакомление с электрическими и принципиальными схемами.
2. Получение статических характеристик исправного средства измерения, проверка повторяемости результатов измерения.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						71
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

3. Получения статических характеристик неисправного средства измерения.

4. Оформление отчета об испытании в форме, представленной в Приложении Б.

Испытания проводятся на основе снятия статической характеристики давления, т.е. получение зависимости установившегося значения выходной величины от значений, задаваемых на входе.

Для реализации методики испытаний воспользуемся следующей программой:

1. Собрать схему для снятия статической характеристики измерительного модуля Метран-150;

2. Зафиксировать в протокол условия проведения испытания;

3. При помощи калибратора давления изменять давление с равным шагом;

4. Выставить давление в зависимости от диапазона и шага;

5. С помощью предоставленного программного обеспечения, снять по 20000 отсчетов давления, записать данные в файл с названием: [Дата_ Время начала эксперимента_номер датчика_подаваемое давление];

6. Повторить п. 4 и 5 для остальных испытываемых модулей.

В качестве завершающего этапа испытаний должен быть составлен протокол проведения испытания.

Условия и порядок проведения испытаний

Испытания должны проводиться в нормальных условиях окружающей среды по ГОСТ 22261-94. Условия проведения испытаний приведены ниже:

- температура окружающего воздуха: $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- относительная влажность воздуха: -от 30% до 80%;
- атмосферное давление: от 84 кПа до 106 кПа;
- частота питающей электросети: $(50 \pm 0,5)$ Гц;
- напряжение питающей сети переменного тока: $(220 \pm 4,4)$ В.

В качестве мер по обеспечению безопасности испытаний должно быть выполнено:

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						72
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

1) помещения, в которых предполагается размещение средств программно-технической реализации, необходимо обеспечить требуемым уровнем защиты от несанкционированного доступа;

2) технические средства и используемое оборудование должны соответствовать всем требованиям санитарных норм, техники безопасности и пожарной безопасности;

3) должна быть обеспечена сохранность технических средств, а также исключена возможность бесконтрольного использования лабораторного оборудования.

Персонал, работающий на соответствующем оборудовании должен соблюдать технику безопасности по работе с электроприборами и системами, находящимися под давлением, а также должен иметь специальные навыки по работе с используемым оборудованием.

Материально-техническое обеспечение испытаний

Для проведения испытаний лаборатория должны быть обеспечена следующим оборудованием:

- контроллер давления;
- источник питания постоянного напряжения, с минимальным коэффициентом пульсации;
- адаптер;
- соединительные провода и трубки;
- термометр и датчик влажности;
- осциллограф;
- баллон с газом.

А также следующим программным обеспечением для ЭВМ со следующим назначением:

- для управления режимом работы калибратора и контроллера давления;
- для сбора данных с исследуемого образца;
- для управления работой осциллографа.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						73
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Отчетность

Отчетность по проведению испытания должны быть представлена в виде протокола к испытанию в форме, представленной в приложении Б.

Протокол проведения испытания испытаний должен быть оформлен на бланке с наименованием «Протокол испытаний» и содержать следующую информацию:

- дата и время проведения испытаний;
- цель испытания;
- полное наименование испытуемого средства измерений;
- условия проведения испытаний;
- наименование эталонов и испытательного оборудования, с применением которых проводились испытания, с указанием их точностных и сведения о поверке и аттестации;
- имя, должность и подпись лица, утвердившего протокол испытаний.

Протокол испытаний должен содержать результаты испытаний.

Вывод по четвертому разделу: в данной главе рассмотрены способы контроля состояния датчиков давления. На основе подтвержденной ранее гипотезы о зависимости СКО шума от количества разделительной жидкости в канале датчика давления представлена возможная схема мониторинга и контроля состояния датчиков давления на участке трубы. Также поэтапно рассмотрен алгоритм диагностики датчика давления. Данный алгоритм основан на значениях показаний двух датчиков давления и анализе шума выходного сигнала.

Помимо этого представлена методика проведения испытаний, необходимых для обоснования работоспособности предложенного алгоритма в эксплуатационных условиях, близких к реальным. «Программа и методика испытаний» составлена в соответствии с нормативно-технической документацией.

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						74
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было исследовано современное состояние в области диагностики технического состояния датчиков давления. Рассмотрены существующие виды отказов и неисправностей преобразователей давления, а также выбран метод диагностики для дальнейшего исследования. Выявлено, что специалистами в области диагностики технического состояния датчиков давления разработаны методы диагностики неисправностей, возникающих в емкостных датчиках. Но для преобразователей давления с тензометрическим принципом действия не было проведено столь глубокого исследования.

Для расширения информации в области диагностики данная работа направлена на выявление признаков неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации датчика давления и разработку практических рекомендаций по реализации алгоритмов диагностики технического состояния преобразователя давления. В данном исследовании рассматривается способ обнаружения неисправности в датчиках давления тензометрического на основе анализа его выходного сигнала.

Во второй главе был проведен анализ состояния датчика давления на основе его статистических и спектральных характеристик. Было выявлено, что при утечке жидкости 11% и более датчик перестает реагировать на входное давление, его характеристика становится нелинейной. Помимо этого построены интервальные оценки СКО и коэффициента асимметрии для исправных и неисправных датчиков. Исходя из полученных результатов, в качестве диагностического параметра для обнаружения неисправности может служить СКО шума, т.к. при утечке жидкости 11% и более СКО существенно уменьшается.

Также построены спектральные характеристики выходного сигнала. По результатам анализа спектра выходного сигналов можно сделать вывод, что для исправных модулей давления характер спектра имеет явно два выраженных пика.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						75
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Неисправные модули имеют равномерный спектр, причем его общая мощность меньше, чем у исправных.

В третьей главе рассмотрены основные способы построения моделей. В качестве инструмента для исследования выбран прикладной пакет ANSYS, в котором проведено моделирование исправного и неисправного состояния датчика давления, в качестве исследуемого элемента был выбран канал с разделительной жидкостью. В ходе моделирования получены контуры распределения фаз и давлений. По полученным данным построена статическая характеристика давления. Полученные численные значения отличаются от ранее рассмотренных экспериментальных данных, но вид характеристики сохранился, что можно объяснить тем, что при моделировании использовалась упрощенная, а не детализированная модель измерительного преобразователя.

В заключительной части рассмотрены способы контроля состояния датчиков давления. На основе подтвержденной ранее гипотезы о зависимости СКО шума от количества разделительной жидкости в канале датчика давления представлена возможная схема мониторинга и контроля состояния датчиков давления на участке трубы. Также поэтапно рассмотрен алгоритм диагностики датчика давления. Данный алгоритм основан на значениях показаний двух датчиков давлений и анализе шума выходного сигнала. Помимо этого представлена методика проведения испытаний, необходимых для обоснования работоспособности предложенного алгоритма в эксплуатационных условиях, близких к реальным. «Программа и методика испытаний» составлена в соответствии с нормативно-технической документацией.

Результаты, полученные в ходе выпускной квалификационной работы, имеют практическую значимость, они могут быть использованы при разработке алгоритмов и методов диагностики технического состояния датчиков давления.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						76
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Замалетдинова, Э.Ю. Сравнительный анализ методов измерения давления / Э.Ю. Замалетдинова, А.И. Егорычев // Вестник КНИТУ. – 2005. – №5(17) – С. 124 – 127.
2. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Изд-во Техносфера, 2005. – 592 с.
3. Датчик давления Метран-150. – <https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog/metran-150-ru-ru>.
4. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения.
5. Тайманов, Р.Е. Метрологический самоконтроль датчиков / Р.Е. Тайманов, К.В. Сапожникова // Датчики и системы. – 2011. – №2. – с. 58-66.
6. Белозубов, Е.М. Моделирование деформаций мембран датчиков давления / Е.М. Белозубов, В.А. Васильев, П.С. Чернов // Измерительная техника. – 2009. – №3. – с. 33-36.
7. Ларионов, В.А. Способ метрологического самоконтроля тензорезистивного датчика давления / В.А. Ларионов // Метрология. – 2020. – №1. – С. 48-62.
8. Вопросы диагностики элементов и структур микроэлектронных датчиков / Байдаров С.Ю., Михайлов П.Г., Мокров Е.А., Митрохин С.В., Соколов А.В., Петрин В.А. // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2012.
9. Михайлов, П.Г. Разработка и исследование методов и средств диагностики элементов и структур микроэлектронных датчиков / П.Г. Михайлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – С. 45-47.
10. Бушуев, О.Ю. Исследование динамической характеристики тензопреобразователя давления с целью диагностики его состояния / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов, А.О. Чернявский // Датчики и системы. – 2011. – №4.
11. Hashemian, H. M. Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures

					ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР	Лист
						77
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дат		

in Nuclear Power Plants // Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 189. – 2011.

12. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения.
13. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
14. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
15. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
16. Пинчук, Р. Три составляющих успеха «Данфосс» в области контроля давления/ Р. Пинчук // Компоненты и технологии. – 2010. – №1. – С. 20-23.
17. Blazquez, J. When a pressure transmitter leaves the linearity: the Rosemount Case // Int. J. Nuclear Energy Science and Technology. – 2006. – Vol. 2. – N 3. – p. 299-307.
18. Hashemian, H.M., Mitchell, D.W., Fain, R.E. and Petersen, K.M. (1993) Long Term Performance and Aging Characteristics of Nuclear Plants Pressure Transmitters, Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-5851, pp.70–79, pp.290–293.
19. Силен, Д. Основы Data Science и Big Data: Python наука о данных / Деви Силен, Арно Мейсман, Мохамед Али; пер. с англ. Е. Матвеев. – СПб.: Питер, 2017. – 335 с.
20. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
21. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
22. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие для вузов / А. Б. Сергиенко. – 2-е изд. – М.; СПб.; Нижний Новгород [и др.]:

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						78
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		

Питер, 2006 – 751.

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

24. Рубцов, С.В. Использование программы ANSYS в процессе изучения взаимодействия двухфазных сред / С.В. Рубцов, К.В. Лебединский, А.И. Евтюшкин // Университетское образование: сб. статей XV Международной научно-методической конференции, посвященной, 50-летию первого космонавта Ю.А. Гагарина. Под ред.: В.И. Волчихина, Р.М. Печерской. – Пензенский государственный университет. – Пенза, 2011. – С. 479-481.

25. Характеристики разделительной жидкости Silicone DC200 industrial. - <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/85412?lang=en®ion=RU>.

26. Coble, J. Online Sensor Calibration Assessment in Nuclear Power Systems / J. Coble, P. Ramuhalli, R. Meyer, H. Hashemian. IEEE: Instrumentation & Measurement Magazine, 2013 – 6 p.

27. Hashemian, H. Calibration Monitoring for Sensor Calibration Interval Extension / H. Hashemian, B. Shumaker, D. Cummins. – 2012. – 4 p.

28. Wehrs, D. Detection of Plugged Impulse Lines Using Statistical Process Monitoring Technology / D. Wehrs. Emerson Process Management. – 2006. – 7 p.

29. ГОСТ 19.301-79 ЕСПД. Программа и методика испытаний. Требования к содержанию и оформлению.

30. ГОСТ 19.105-78 ЕСПД. Общие требования к программным документам.

					<i>ЮУрГУ – 12.03.01.2020.299 ВКР</i>	<i>Лист</i>
						79
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дат</i>		