

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Гашенко Юлия Валерьевна

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ
ЖИДКОСТЕЙ**

Специальность 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие
системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Астапов Владислав Николаевич

САМАРА 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД НА ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ.....	13
1.1 Анализ предметной области.....	13
1.2 Анализ известных способов и средств измерения плотности жидких сред	16
1.3 Основные конструкции поплавковых плотномеров жидких сред, применяемых для контроля плотности жидких пожароопасных сред.....	27
1.4 Анализ существующих информационно-измерительных систем для определения плотности нефти и нефтепродуктов	35
1.5 Оценка перспективности внедрения волоконно-оптических датчиков и систем измерения плотности пожароопасных жидкостей.....	39
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД.....	45
2.1 Описание измерительного преобразователя в составе датчика плотности жидких сред	45
2.2 Математическое моделирование физических процессов, происходящих в механической системе измерительного преобразователя плотности.....	47
2.3 Распределение светового потока в оптическом канале измерительного преобразователя плотности жидких сред	53
2.3.1 Основные сведения о распределении светового потока в волоконно-оптических преобразователях с открытым измерительным каналом	53

2.3.2 Модуляция светового потока в открытом измерительном канале волоконно-оптического преобразователя.....	59
3 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ.....	67
3.1 Структура волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей	68
3.2 Разработка алгоритма функционирования волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей	72
3.2.1 Разработка алгоритма калибровки волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей	73
3.2.2 Разработка алгоритма измерения волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей	76
3.3 Разработка датчика плотности в составе волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей	81
4 АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ	102
4.1 Энергетический расчет оптического канала волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей	103
4.2 Метрологический анализ волоконно-оптической информационно- измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей.....	107

4.3 Методика проведения калибровки и результаты испытания системы	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	133
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	160

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Плотность является универсальным и одним из важнейших показателей качества нефти и ее производных. Ее измерение позволяет отслеживать процесс переработки, контролировать брак продукции, качество сырья, промежуточных и конечных продуктов, а также вести массовый учёт. Несвоевременный контроль плотности нефти и нефтепродуктов ведет к снижению эффективности переработки, нарушению работы установок нефтеперерабатывающих заводов, деградации качества продукции, экономическим потерям, а также увеличению риска утечек, повреждения оборудования, аварийных ситуаций и, как следствие, экологическим последствиям. Применяемые в настоящее время измерительные устройства обеспечивают, в большинстве случаев, дискретное измерение плотности в лабораторных условиях, что не обеспечивает своевременного контроля над плотностью продукта в непрерывном режиме, а также является достаточно трудоёмким процессом, который может осложняться агрессивностью и искро- взрыво- пожароопасностью сред, быстротой изменения параметров процесса, состава и физико-химических свойств анализируемой среды, высокими температурами протекания процессов, а также отдаленностью технологических объектов, где своевременное проведение лабораторных измерений данного параметра невозможно. Существующие средства и системы непрерывного измерения и контроля плотности жидких сред, позволяющие производить оперативный контроль по месту протекания технологического процесса, не получили достаточно широкого применения в нефтяной промышленности по причине таких недостатков, как невысокая точность по сравнению с лабораторными методами, эксплуатационная ограниченность, диапазоны рабочих температур, не соответствующие высокотемпературному характеру процессов нефтепереработки, а также наличие электрических составляющих в искро- взрыво- пожароопасных анализируемых средах и в их

непосредственной близости, что требует дополнительных решений, обеспечивающих безопасность измерений и эксплуатации систем.

В настоящее время существует проблема отсутствия средств оперативного контроля плотности жидких искро- взрыво- пожароопасных сред в условиях высокотемпературных технологических процессов на объектах нефтепереработки, обеспечивающих эксплуатационную простоту, надежность, универсальность и безопасность.

Степень разработанности темы исследований. Для непрерывного встроенного контроля плотности жидкостей в технологических емкостях в промышленных условиях применение находят поплавковые плотномеры, вопросами разработки и модернизации которых занимались Г.И. Котляр, А.А. Хачков, В.В. Рыбаков, М.А. Ураксеев, Д.М. Мордасов, А.С. Галкин, А.И. Лакеев, И.П. Осипчук и др. Анализ проводимых исследований помог определить перспективные направления и проблемы разработки и модернизации датчиков и информационно-измерительных систем, среди которых можно выделить простоту конструктивных и эксплуатационных решений, обеспечение непрерывности и необходимой точности измерения, а также возможности применения при высокотемпературных и взрывопожароопасных режимах работы.

Одним из способов решения проблемы является использование волоконно-оптических датчиков плотности и волоконно-оптических информационно-измерительных систем по причине ряда их преимуществ, среди которых выделяются надежность, устойчивость к помехам и воздействиям среды, взрывобезопасность, компактность и т.д. Проблемами создания волоконно-оптических информационно-измерительных систем занимались Е.А. Бадеева, В.И. Бусурин, А.Г. Годнев, А.В. Гориш, В.А. Зеленский, Н.Е. Конюхов, Т.И. Мурашкина, И.Т. Назарова, А.Л. Патлах, А.Г. Пивкин, Д.И. Серебряков и др.

Вследствие этого актуальной является задача разработки волоконно-оптической информационно-измерительной системы (ВОИИС) для определения плотности жидких сред на основе поплавкового датчика плотности.

Цель диссертационного исследования - обеспечение безопасного оперативного контроля плотности пожароопасных жидкостей на объектах нефтегазового комплекса в условиях высокой искро- взрыво- пожароопасности.

Основные задачи исследования:

- 1) анализ существующих способов, датчиков и измерительных систем для определения плотности жидких сред, применяемых на объектах нефтепереработки;
- 2) математическое обоснование физических процессов, происходящих в оптико-механической системе измерительного преобразователя плотности жидких сред, а также распределения светового потока и его модуляции в открытом оптическом канале измерительного преобразователя с применением растровой решетки.
- 3) определение функциональной зависимости между перемещением поплавка и плотностью жидкой среды, а также преобразование значения перемещения в информационный сигнал для его дальнейшей обработки;
- 4) разработка технического решения ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей на основе поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем в его составе;
- 5) разработка структуры ВОИИС для определения плотности жидких сред с поплавковым датчиком плотности в ее составе, позволяющей оперативно производить измерение плотности жидких сред в автоматизированном режиме;
- 6) разработка алгоритма функционирования ВОИИС с режимами калибровки и измерения плотности, учитывающего конструктивные параметры измерительного преобразователя, полученные данные калибровки и температурную поправку плотности при преобразовании перемещения поплавка в искомое значение плотности жидкости;
- 7) анализ ВОИИС для оценки оптических потерь и определения основных источников погрешностей и способов их минимизации, реализация и проведение экспериментальных исследований ВОИИС для определения плотности жидких сред в лабораторных условиях с целью подтверждения ее работоспособности и оценки точности.

Объект исследований - ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с применением поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем как элемента системы.

Предмет исследований - техническое решение ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей на основе поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем, структура ВОИИС и алгоритмы ее функционирования.

Методы исследования. В диссертационном исследовании использовались методы классической механики, методы математического моделирования, методы энергетического расчета, а также основные положения волновой и геометрической оптики, теории измерений, теории планирования эксперимента и математической обработки полученных данных. Моделирование и обработка данных проводились с помощью программных средств Microsoft Excel, Matlab, сред программирования для языка Python, среды разработки IAR Embedded Workbench.

Задачи, решенные в диссертации, соответствуют областям исследования специальности 2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы:

п.1 – научное обоснование разработанной структуры и алгоритмов функционирования ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с применением поплавкового плотнмера с волоконно-оптическим растровым преобразователем,

п.2 – исследование и разработка структуры и технического решения ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с применением поплавкового плотнмера с волоконно-оптическим растровым преобразователем в ее составе, исключающей электрические элементы в измерительной среде, обеспечивающей искро- взрыво- пожаробезопасность, простоту конструкции и эксплуатации, а также работу в условиях высоких температур, свойственных технологическим процессам нефтепереработки,

п.3 – алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение разработанной ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, подразумевающее как режим измерения, так и режим калибровки, а также

учитывающее конструктивные параметры измерительного преобразователя, данные калибровки и температурные условия проводимых измерений.

Новизна научных результатов заключается в:

1) Предложена структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с поплавковым датчиком плотности и волоконно-оптическим растровым преобразователем в ее составе, которая предусматривает как режим калибровки, так и режим измерения на основе полученных в результате калибровки данных, а также позволяет учитывать температурные условия технологического процесса и производить приведение измеренных значений плотности к стандартным условиям.

2) Разработан алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред, обеспечивающий работу в режиме калибровки, который учитывает конструктивные параметры измерительного преобразователя и позволяет определить калибровочные коэффициенты для дальнейшего их применения при измерении плотности.

3) Разработан алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред, обеспечивающий работу в режиме измерения, который учитывает конструктивные параметры измерительного преобразователя, полученные по результатам проведенной калибровки калибровочные коэффициенты и температурную поправку плотности для приведения результатов измерения к стандартным условиям.

4) Предложено техническое решение ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, защищенное патентом РФ, с измерительной частью в виде поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем в его составе.

Практическая значимость работы.

1) Предложено решение практической задачи непрерывного оперативного контроля плотности пожароопасных жидких сред на объектах нефтепереработки посредством применения ВОИИС с поплавковым датчиком плотности и волоконно-оптическим растровым преобразователем в ее составе, обеспечивающее

необходимую точность, простоту конструкции, эксплуатации и преобразования измеряемой величины, искро-взрыво- пожаробезопасность и соответствие диапазона рабочих температур условиям протекания технологических процессов нефтепереработки.

2) Предложена структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с поплавковым датчиком плотности и волоконно-оптическим растровым преобразователем в ее составе, а также алгоритмы ее функционирования, которые предусматривают как режим калибровки, так и режим измерения на основе полученных в результате калибровки данных, а также позволяет учитывать температурные условия технологического процесса и производить приведение измеренных значений плотности к стандартным условиям.

3) Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на предприятия профильной направленности ЗАО «ТМ-Сервис» и ООО «Метрология и Автоматизация», г. Самара.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с поплавковым датчиком плотности и волоконно-оптическим растровым преобразователем в ее составе, которая предусматривает как режим калибровки, так и режим измерения, а также позволяет учитывать температурные условия технологического процесса и производить приведение измеренных значений плотности к стандартным условиям.

2) Алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред, обеспечивающий работу в режиме калибровки, который учитывает конструктивные параметры измерительного преобразователя и позволяет определить калибровочные коэффициенты для дальнейшего их применения при измерении плотности.

3) Алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред, обеспечивающий работу в режиме измерения, который учитывает

конструктивные параметры измерительного преобразователя, полученные по результатам калибровки калибровочные коэффициенты и температурную поправку плотности для приведения результатов измерения к стандартным условиям.

4) Техническое решение ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, защищенное патентом РФ, с измерительной частью в виде поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем.

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль в формулировке задач, обосновании методов их решения, анализе полученных результатов.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Полученные результаты обоснованы адекватностью и общеизвестностью применяемых методов и положений, а также подтвержденными исследованиями фактами. Достоверность результатов работы подтверждается их реализацией и экспериментальными исследованиями.

Материалы диссертации обсуждались и докладывались на следующих конференциях: X Международная научно-практическая конференция: «Научные исследования и разработки: новое и актуальное» (г. Ростов-на-Дону, 2021 г.); Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (г. Казань, 2022 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Ашировские чтения» (г. Самара, 2024 г.); 63-я международная научно-практическая конференция «Advances in Science and Technology» (г. Москва, 2024 г.); XIX Всероссийская научно-техническая конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП-2024) (г. Бийск, 2024 г.); LXXXII Международная научно-практическая конференция «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» (г. Новосибирск, 2024 г.).

По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, 4 из которых входят в журналы из перечня ВАК. Получено 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, приложений. Основная часть изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 12 таблиц, 4 приложения. Библиографический список содержит 91 наименование.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД НА ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

1.1 Анализ предметной области

Актуальной является задача измерения плотности нефти и нефтепродуктов как одного из основных и важнейших показателей качества на стадиях добычи, переработки, транспорта. Своевременный оперативный контроль плотности позволяет контролировать и прогнозировать качество продукции и сырья в соответствии с международными стандартами на различных этапах производства и переработки, производить массовый, объемный и качественный учет нефти и нефтепродуктов, производить мониторинг нарушений технологического процесса, выявлять незаконные врезки и утечки в трубопроводах и так далее. Следовательно, возникает проблема обеспечения точности и достоверности контроля плотности, а также разработки новых решений для первичных преобразователей, датчиков и информационно-измерительных систем. Эти решения должны быть простыми в разработке и эксплуатации, а также удобными для преобразования физических величин, их обработки, передачи и отображения полученной информации [4].

Плотность нефти на российских месторождениях колеблется в пределах 750 – 950 кг/м³ в зависимости от района добычи и измеряется как непосредственно после ее добычи, так и при ее переработке, и позволяет судить о ее составе. Высокая плотность свидетельствует о высоком содержании ароматических углеводородов, низкая - о преобладании парафиновых углеводородов. Для переработки и получения нефтепродуктов высокого качества оптимальна нефть низкой плотности. Знание важных характеристик нефти, среди которых выступает ее плотность, позволяет выбрать наиболее подходящую и результативную технологию переработки.

Нефтепродукты отличаются по составу, области применения, физико-химическим свойствам, методам производства. Например, у бензинов кроме такого важного показателя как октановое число, позволяющее определить детонационные

свойства, еще одной значимой характеристикой является плотность, знание которой позволяет определить химический состав бензина и достоверность предоставленной марки бензина, его объемный вес, и имеет существенное значение при отпуске и приеме топлива.

Кроме того, показатель плотности может служить энергетической характеристикой топлива, так как его более высокое значение указывает на то, что при сгорании топлива выделяется больше энергии, а значит, возрастает эффективность его потребления. Показатели плотности для различных марки топлив определяются государственными и международными стандартами.

Согласно ГОСТ 32513-2013 «Топлива моторные. Бензин неэтилированный» [33] и ГОСТ 32513-2023 «Бензин автомобильный» [34] плотность бензина марок АИ-80, АИ-92, АИ-95, АИ-98 допускается в пределах 725 – 780 кг/м³ при $\Theta=15^{\circ}\text{C}$. Практические показатели плотности бензинов различных марок при $\Theta=15^{\circ}\text{C}$ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Показатели плотности различных марок бензина

Марка бензина	АИ-80	АИ-92	АИ-95	АИ-98
Плотность, кг/м ³	725 - 730	740 - 770	745 - 780	765 - 780

Нормы плотности для керосина и реактивного топлива определяются ГОСТ 10227 – 2013 «Топлива для реактивных двигателей» [30] и приведены в таблице 1.2. Значения указаны для $\Theta=20^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1.2 - Показатели плотности различных марок топлива для реактивных двигателей

Марка топлива	ТС-1	Т-1С	Т-1	Т-2	РТ
Плотность, кг/м ³	775	800	800	755	775

Нормы плотности для дизельного топлива определяются ГОСТ 305-2013 «Топливо дизельное» [31] и приведены в таблице 1.3. Значения указаны для $\Theta=15^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1.3 - Показатели плотности различных марок дизельного топлива

Марка топлива	Л	Е	З	А
Плотность, кг/м ³	775	800	800	755

Управление современными технологическими процессами требует высокого уровня их автоматизации, и периодическое измерение плотности в том числе в лабораторных условиях зачастую оказывается недостаточным, так как состав нефти и нефтепродуктов с течением времени может значительно изменяться, как и другие физико-химические параметры. Также возникают сложности с оперативным контролем плотности на отдаленных технологических объектах, где своевременно провести лабораторные измерения данного параметра невозможно. Возникает необходимость в средствах непрерывного автоматизированного измерения плотности жидких сред. Тем не менее в нефтяной промышленности внедрение таких систем происходит не так активно, так как в основном измерение плотности производится с помощью лабораторных методов, а методика измерений является стандартизированной.

Некоторая сложность разработки информационно-измерительных систем для контроля плотности веществ во многом определяются особенностями этой области измерительной техники, основные из которых сводятся к следующему: большая номенклатура контролируемых веществ (жидкости, газы, многофазные потоки, сжиженные газы и др.) и широкий диапазон изменений параметров состояния (давление, температура и др.) обуславливает большой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в рассматриваемой области. Возрастающие требования, предъявляемые к контролю

плотности, задают тенденцию к разработке новых и совершенствованию существующих измерительных систем для определения плотности веществ.

1.2 Анализ известных способов и средств измерения плотности жидких сред

Плотность жидкой среды представляет собой физический параметр, методы измерения которого основываются на определенных физических законах, которые устанавливают функциональную связь между измеряемой плотностью и другими физическими параметрами [72].

Средства измерения плотности жидких сред подразделяются на лабораторные и промышленные. Лабораторные приборы, такие как ареометры и пикнометры, отличаются высокой точностью и предназначены для дискретного измерения плотности образцов исследуемых жидкостей. Однако они не подходят для непрерывного и оперативного контроля. В процессе технологического производства возникает необходимость в постоянном измерении плотности непосредственно по месту установки, так как состав и физико-химические параметры нефти и нефтепродуктов с течением времени могут значительно изменяться в зависимости от условий различного характера (дегазация, испарение летучих соединений, изменение температуры и т.д.).

Анализ современного состояния методов непрерывного измерения плотности жидкостей показывает, что существует широкий спектр технологий, основанных на различных физических явлениях и законах. Исходя из этого, представляется возможным выстроить перечень методов измерения плотности жидкости [20]:

- поплавковый
- весовой
- вибрационный
- гидростатический
- гидродинамический (силовой)

- вихревой
- ультразвуковой
- радиоизотопный.

Поплавковые плотномеры являются наиболее простыми применительно к жидким средам. В зависимости от положения поплавка относительно границы раздела «жидкость - газовая среда» выделяют плотномеры с плавающим и погруженным поплавком. Плотномеры с плавающим поплавком позволяют определять плотность жидкой среды по глубине погружения поплавка. Поплавковые плотномеры с погруженным поплавком измеряют перемещение поплавка, значение которого коррелирует с искомой плотностью жидкости. Такие устройства комплектуются различными преобразователями положения поплавка, например, механическими [8] или магнитными [62, 74, 77]. В отличие от них, поплавково-весовые плотномеры измеряют выталкивающую силу, воздействующую на поплавок, который при этом остается неподвижным. Это достигается за счет уравнивания выталкивающей силы противоположно направленным усилием, что обеспечивает стабильность измерений [9, 10, 55, 75]. Таким образом, выбор типа плотномера зависит от требуемого метода измерения и условий эксплуатации, определяющих необходимость фиксации перемещения или равновесия сил.

Поплавковые плотномеры отличаются высокой чувствительностью, что делает их эффективными для измерения плотности однородных жидкостей и слабоконцентрированных суспензий, однако они не подходят для жидких сред с быстрооседающей дисперсной фазой, так как это может привести к неточным измерениям. Несмотря на свои преимущества, поплавковые плотномеры обладают рядом ограничений, влияющих на их применение. К ключевым недостаткам таких устройств относятся значительные габариты конструкции, что усложняет их монтаж в условиях ограниченного пространства. Показания приборов могут искажаться из-за капиллярных эффектов, возникающих на границе взаимодействия жидкости и поплавка, а также под воздействием турбулентности или вибрации потока измеряемой среды. Открытая конструкция корпуса, необходимая для

визуального контроля или прямого контакта с рабочей средой, повышает риск загрязнения чувствительных элементов и требует регулярного обслуживания. Кроме того, постоянное взаимодействие поплавка с агрессивными или абразивными средами приводит к износу компонентов, сокращая срок службы устройства. Эти факторы ограничивают использование поплавковых плотномеров в системах с высокими требованиями к компактности, стабильности условий измерения и защищенности от внешних воздействий. В плотномерах с полностью погруженным поплавком влияние капиллярных свойств жидкости может быть минимизировано, однако такие устройства, устанавливаемые в потоке жидкости, требуют наличия успокоителя, позволяющего компенсировать и минимизировать колебания рабочей среды. Проблема налипания частиц и загрязнения поплавка решается применением принудительной вибрации или ультразвукового воздействия [61]. Плотномеры поплавкового типа выпускаются компаниями ООО «Союзцветметавтоматика» (Россия), Атом (Россия), НПП «Сенсор» (Россия), Lemis Baltic (Латвия), Tobias Associates (США).

Принцип действия весовых плотномеров основан на функциональной зависимости массы, объема и плотности вещества. В таких устройствах масса среды, находящейся в измерительной зоне, прямо пропорциональна ее плотности при условии постоянного объема. Наиболее распространены конструкции, где чувствительным элементом служит подвижный измерительный участок трубы — прямой или петлеобразный, — соединенный с неподвижным технологическим трубопроводом посредством эластичных элементов. Эта конструкция обеспечивает свободное перемещение участка трубы при изменении массы среды. Возникающее смещение фиксируется специализированными датчиками, такими как дифференциально-трансформаторные [44, 79], индуктивные или манометрические [84], преобразующими механическое движение в электрический сигнал. Таким образом, колебания плотности среды косвенно определяются через измерение смещения измерительного участка, что обеспечивает высокую точность даже в условиях переменных внешних воздействий.

Среди недостатков весовых плотномеров выделяются такие как невозможность их применения в неоднородных жидких средах в т. ч. с наличием пузырьков, взвесей, грязевых частиц; постоянное загрязнение трубок; возникновение центробежной силы в петлеобразных трубках; скоростной напор потока жидкости; температурная и временная нестабильность коэффициентов жесткости эластичных элементов и измерителя массы [29, 64]. Весовые плотномеры выпускаются производителями Elcometer Limited (Великобритания), Стеклоприбор (Россия), Simax (Чехия).

Вибрационные плотномеры производят измерение плотности жидкости или газа, основываясь на зависимости амплитуды колебаний или резонансной частоты вибратора в виде трубки или пластины от плотности измеряемой среды [46].

Частотные вибрационные плотномеры широко распространены и обладают значительными преимуществами по сравнению с амплитудными аналогами. Их высокая точность обусловлена зависимостью измеряемой частоты исключительно от параметров резонатора, что минимизирует влияние внешних факторов. К ключевым достоинствам также относятся повышенная чувствительность и надежность, прямое преобразование плотности среды в частотный выходной сигнал для упрощения интеграции с системами управления, а также независимость результатов измерений от вязкости контролируемого вещества [15]. Однако эти устройства не лишены недостатков. Ограниченный допустимый расход среды требует точной настройки под конкретные технологические процессы, а нелинейность шкалы усложняет процедуру калибровки. Дополнительные сложности связаны с необходимостью компенсации воздействия температуры и давления на резонатор [42, 43], а также риском конденсации влаги и образования отложений на его поверхности, что может искажать данные. Таким образом, эксплуатация вибрационных плотномеров, несмотря на их технологическую эффективность, требует тщательного контроля рабочих условий и применения инженерных решений для нейтрализации помех, что обеспечивает точность измерений в разнообразных промышленных средах. Известны вибрационные

плотномеры производителей AFT (США), Lemis Baltic (Латвия), Mettler-Toledo (Швейцария), Термэкс (Россия), Пьезоэлектрик (Россия).

Принцип действия гидродинамических (силовых) плотномеров основан на зависимости между силой удара струи жидкости и ее плотностью. Сила струи F , действующая на перпендикулярно расположенную плоскую пластинку, может быть выражена следующим образом [52]:

$$F = S \cdot v^2 \cdot \rho,$$

где S - площадь поперечного сечения, v - скорость струи, ρ - плотность жидкости.

Гидродинамические плотномеры основаны на принципе измерения перемещения пластины, вызванного силой удара струи жидкости при постоянной скорости ее истечения, пропорциональной плотности среды [80]. Для регистрации смещения пластины применяются пневматические или пьезоэлектрические преобразователи. Однако такие системы имеют ряд ограничений: конструктивная сложность, связанная с интеграцией высокоточного динамометра в рабочую среду, необходимость поддержания стабильной скорости потока, снижение пропускной способности трубопровода из-за уменьшения сечения, а также потребность в создании зоны разрежения за измерителем гидродинамического давления.

Гидростатические плотномеры используют зависимость давления столба жидкости от ее плотности. Эти устройства делятся на два типа: первые измеряют высоту столба жидкости, вторые — его давление. В приборах, определяющих высоту, применяются слаботочные катушки индуктивности [7], расположенные вокруг измерительной колонны. Для компенсации колебаний уровня жидкости используются методы, такие как U-образные сообщающиеся сосуды [71], обеспечивающие стабилизацию, или дифференциальный подход, основанный на разности давлений между двумя столбами жидкости разной высоты [39, 49]. Несмотря на относительную простоту, гидростатические методы требуют точной калибровки и учета внешних факторов, влияющих на стабильность измерений, что делает их применение эффективным в системах с контролируемыми условиями эксплуатации.

Тепловое расширение жидкости, вызывающее увеличение ее объема, воздействует на чувствительные элементы приборов, что делает необходимым внедрение устройств для температурной компенсации [73].

Достоинства гидростатических плотномеров включают отсутствие погружных подвижных элементов, что упрощает конструкцию и повышает надежность. Однако недостатки таких устройств заключаются в их громоздкости, значительном запаздывании показаний, ограниченной возможности использования при высоких давлениях, а также в необходимости постоянного перемешивания жидкости в измерительной колбе для обеспечения точности измерений. Приборы этого типа производят Альбатрос (Россия), Lemis Baltic (Латвия) и Mettler-Toledo (Швейцария).

Принцип работы вихревых плотномеров основан на зависимости частоты вихревых колебаний от плотности измеряемой среды. Вихри образуются посредством установки на пути потока специального тела обтекания. Колебания потока, возникающие за счет этого и зависящие от его плотности и скорости, регистрируются с помощью пьезоэлектрических датчиков. К недостаткам данного метода можно отнести низкую точность измерений, необходимость регулярной очистки тела обтекания от налипающих частиц рабочего вещества, а также ограниченную возможность применения таких датчиков в вязких средах.

Ультразвуковой метод измерения плотности основан на следующей функциональной зависимости [19]:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta_{ад}}}$$

где c - скорость распространения ультразвука в жидкости, ρ - ее плотность, $\beta_{ад}$ - коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

Ультразвуковые средства измерения плотности отличаются высокой надежностью, чувствительностью и минимальной инерционностью, что обеспечивает быстрое измерение даже в динамичных процессах. Их ключевое преимущество — возможность минимизировать прямой контакт с контролируемой

средой за счет использования непрямых методов или защитных материалов, сохраняющих целостность чувствительных элементов. Однако применение таких устройств требует предварительного знания акустических свойств жидкости, таких как скорость звука и коэффициент затухания, что сужает область их применения до сред с априорно известными параметрами.

По типу измеряемого параметра ультразвуковые плотномеры классифицируются на три группы. Скоростные приборы определяют плотность через зависимость скорости распространения ультразвуковой волны от характеристик среды. Импедансные устройства анализируют изменения акустического сопротивления на границе раздела сред. Третья группа — плотномеры, основанные на измерении поглощения звуковой энергии при прохождении через жидкость [11, 45]. Каждый из методов имеет свою специфику: например, скоростные плотномеры эффективны для однородных жидкостей, тогда как импедансные могут применяться в системах с многофазными средами. Несмотря на технологические различия, все группы объединяет необходимость точной калибровки и учета внешних факторов, таких как температура и наличие примесей, влияющих на акустические свойства исследуемых веществ.

Ультразвуковые плотномеры, несмотря на свои преимущества, имеют ряд технических и эксплуатационных ограничений. Одной из ключевых проблем является риск возникновения кавитации, особенно при работе с кипящими жидкостями, что сложнопрогнозируемо и существенно снижает надежность внутрибаковых датчиков. Разработка таких устройств сопряжена с технологическими сложностями, так как создание датчиков с заданными резонансными характеристиками требует значительных научно-технических и финансовых ресурсов. Кроме того, точность измерений может снижаться из-за температурных градиентов в газовой подушке над жидкостью, хаотичных изменений ее физических свойств (например, при подсосе воздуха во время слива), а также колебаний условий реверберации радиоволн внутри емкости. Важным источником погрешности становится неравномерное распределение параметров газа по высоте резервуара, искажающее акустические измерения. Эксплуатация

ультразвуковых плотномеров также предполагает необходимость регулярной поверки с использованием образцовых средств, что увеличивает затраты на обслуживание. Высокая стоимость самих датчиков и их компонентов ограничивает их внедрение, несмотря на потенциальную эффективность в контроле плотности жидкостей. Эти факторы требуют тщательного анализа условий применения и разработки компенсационных мер для минимизации погрешностей. Среди производителей современных плотномеров данного принципа действия выделяют датчики фирм Геотрон (Россия), Haffmans B.V. (Нидерланды), Flixim (Германия), Thermo MeasureTech (США), Solartron (Великобритания).

Радиоизотопные плотмеры — это бесконтактные устройства, применяемые преимущественно в ситуациях, где традиционные методы измерения плотности жидкостей недоступны или неэффективны. Их ключевое преимущество заключается в способности работать в труднодоступных зонах, включая агрессивные, высокотемпературные или герметично изолированные среды. Однако точность таких приборов напрямую зависит от физических свойств жидкости, особенно ее молекулярной массы, что требует индивидуальной градуировки для каждой конкретной среды. Процедура калибровки предполагает использование эталонных веществ, например, дистиллированной воды, или механических решений, таких как поворотный сегмент в контейнере с радиоизотопом [16, 47, 51, 52].

Основу метода составляет измерение ослабления гамма-излучения [17] при прохождении через анализируемое вещество. Интенсивность поглощения излучения определяется энергией и спектральным составом падающего пучка, а также плотностью и химическим составом контролируемой среды. Это позволяет косвенно вычислять плотность, анализируя степень ослабления потока частиц.

Несмотря на уникальные возможности, радиоизотопные плотмеры требуют тщательного учета ряда ограничений. Помимо сложностей с калибровкой, их применение сопряжено с необходимостью обеспечения радиационной безопасности, что повышает требования к персоналу и оборудованию. Кроме того, изменение химического состава жидкости в процессе эксплуатации может

искажать результаты, требуя повторной настройки прибора. Таким образом, эти устройства остаются узкоспециализированным решением, эффективным в условиях, где альтернативные методы неприменимы, но их внедрение требует взвешенной оценки рисков, затрат и технической целесообразности.

Поглощение гамма-излучения веществом с достаточной степенью точности описывается экспоненциальной зависимостью [78]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\eta d \rho}$$

где I_0 - начальная интенсивность пучка гамма-лучей; I - интенсивность гамма-излучения, прошедшего через слой вещества толщиной d и плотностью ρ ; η - массовый коэффициент поглощения гамма-излучения.

Измерение плотности жидкости с использованием гамма-излучения реализуется двумя основными методами. Первый основан на анализе ослабления интенсивности прямого пучка гамма-лучей после его прохождения через исследуемую среду, где степень поглощения коррелирует с плотностью вещества [59]. Второй метод предполагает регистрацию ослабления интенсивности рассеянного жидкостью пучка излучения, что также позволяет косвенно определить плотность за счет взаимодействия частиц с молекулами среды [82].

Применение этих методов сопряжено с существенными ограничениями. Необходимость использования специальных защитных мер для минимизации воздействия ионизирующего излучения на персонал и оборудование повышает сложность эксплуатации. Кроме того, постепенное снижение активности радиоактивного источника со временем требует регулярной калибровки или замены компонентов, а высокая стоимость как самих источников, так и систем радиационной безопасности делает технологию экономически невыгодной для массового производства плотномеров. Эти факторы сужают область применения радиоизотопных методов преимущественно до специализированных задач, где альтернативные решения недоступны, — например, в условиях экстремальных температур, агрессивных сред или герметичных систем. Таким образом, несмотря на уникальные возможности, метод остается нишевым, а его внедрение требует тщательного анализа технико-экономической целесообразности. Основными

производителями радиоизотопных плотномеров являются SAIP (Франция) и Ohmart (США).

Рассмотрев наиболее применяемые способы измерения плотности жидкостей, можно прийти к выводу, что широкому промышленному использованию плотномеров препятствует их несовершенство, связанное с особенностями конструкций, трудоемкостью монтажа и обслуживания, большими габаритами и массой, недостаточной надежностью и высокой стоимостью.

Все механические методы измерения плотности имеют общий существенный недостаток - наличие подвижных частей в конструкции первичных преобразователей. Использование подвижных элементов в датчиках плотности приводит к их ускоренному износу, что снижает общую надежность и долговечность устройств. Это вынуждает проводить регулярное техническое обслуживание и замену изнашиваемых компонентов, увеличивая эксплуатационные расходы. Конструктивная громоздкость силовых и гидростатических плотномеров, а также необходимость обеспечения специфических условий для протекания жидкости - например, стабильного давления или скорости потока - существенно сужают сферу их использования. Монтаж подобных систем зачастую требует значительного пространства и специальных эксплуатационных условий, что ограничивает их универсальность.

Для весовых, вибрационных и вихревых плотномеров характерна проблема накопления отложений на поверхностях измерительных элементов. Это явление искажает данные и вынуждает внедрять сложные конструктивные решения, такие как защитные покрытия или системы самоочистки, а также усложнять алгоритмы обработки сигналов для компенсации помех. Подобные меры повышают стоимость разработки, производства и обслуживания устройств, делая их менее экономически выгодными. Таким образом, несмотря на функциональные преимущества, перечисленные ограничения требуют тщательного анализа целесообразности применения каждого типа плотномеров в конкретных технологических процессах.

Ультразвуковые плотноммеры, несмотря на свои преимущества, такие как бесконтактное измерение и высокая чувствительность, имеют ряд существенных

недостатков. Они не обладают достаточной надежностью, сложны в обслуживании и требуют значительных затрат на производство, установку, эксплуатацию и ремонт. Эти факторы ограничивают их широкое применение в промышленности.

Радиоизотопные плотномеры обладают высокой стоимостью из-за дороговизны изотопов и необходимости защиты от излучения, что требует массивных экранирующих конструкций. Их эксплуатация предполагает обязательное присутствие служб радиационного контроля и соблюдение строгих норм безопасности, особенно во взрывоопасных средах, где требования к защите дополнительно увеличивают габариты и стоимость систем. Эти ограничения делают метод экономически оправданным лишь в специфических условиях, где альтернативные методы неприменимы, например, при работе с агрессивными средами или в герметичных установках.

В таблице 1.4 приведен сравнительный анализ известных способов измерения плотности жидких сред.

Таблица 1.4 - Сравнительный анализ способов измерения плотности жидких сред

Способ измерения	Абсолютная погрешность, кг/м ³	Приведенная погрешность, %	Диапазон рабочих температур, °С
Поплавковый (поплавково-весовой)	0,5 – 2,5	0,2 – 2	минус 50...200
Весовой	0,5 – 3	0,5 – 1	минус 45...80
Вибрационный	0,1 – 0,9	0,5 – 1	минус 50...80
Гидростатический	0,5 - 1	2 – 4	минус 45...75
Гидродинамический (силовой)	0,5 - 1	2	минус 40...80
Вихревой	4 - 5	1,5 – 2	минус 40...80
Ультразвуковой	0,1 – 0,5	2 - 5	минус 40...400
Радиоизотопный	15 - 30	2	минус 40 ...60

Из всего вышесказанного следует, что обеспечение безопасности и надежности информационно-измерительных систем при измерении плотности жидкостей связано с рядом сложностей. Поскольку большинство датчиков используют элементы электрических цепей, а исследуемые жидкие среды часто обладают взрывопожароопасными свойствами (с риском

образования искры), становится необходимым внедрение дополнительных защитных мер. Это, в свою очередь, приводит к увеличению массы и габаритов устройств, что ухудшает их компактность и удобство эксплуатации. Таким образом, при проектировании информационно-измерительных систем необходимо искать компромисс между безопасностью, надежностью и оптимальными техническими характеристиками, что часто делает системы более сложными и дорогостоящими [21].

Возрастающие требования к качеству сырья, готовой и промежуточной продукции, а также необходимость оперативного и непрерывного контроля их качественных параметров, подчеркивают важность разработки новых и совершенствования существующих методов и средств измерения плотности. Современные условия диктуют потребность в простоте, безопасности и надежности конструкций, а также в удобстве эксплуатации и точности измерений. Это стимулирует к поиску инновационных решений, которые смогут устранить существующие недостатки, такие как громоздкость, высокая стоимость, сложность обслуживания и эксплуатационные ограничения в специфических условиях.

Разработка новых методов и устройств должна быть направлена на создание компактных, точных, энергоэффективных и универсальных плотномеров, способных работать в широком диапазоне анализируемых сред, включая взрывопожароопасные. Это позволит повысить качество контроля технологических процессов и конечной продукции, что особенно важно в условиях растущей конкуренции и требований к экологической и промышленной безопасности.

1.3 Основные конструкции поплавковых плотномеров жидких сред, применяемых для контроля плотности жидких пожароопасных сред

В настоящее время в России и за рубежом для встроенного контроля плотности жидких сред в емкостях различного назначения широкое применение

находят плотномеры на основе поплавкового (ареометрического) метода измерения плотности по причине их простоты эксплуатации и обслуживания, надежности и универсальности.

Поплавковые плотномеры для измерения плотности жидкостей делятся на два основных типа: с частичным и полным погружением поплавка. Конструктивное разнообразие таких устройств определяется конструкцией поплавка, а также типом преобразователей его перемещения — механическими, электрическими, пневматическими, оптическими и др. Принцип преобразования сигнала может быть реализован через индуктивные, потенциометрические, оптоэлектронные и другие методы, обеспечивающие связь между положением поплавка и выходными сигналами. Такая вариативность позволяет адаптировать приборы под конкретные условия эксплуатации и требования к точности измерений [52].

В плотномерах с частичным погружением поплавок плавающий поплавок с сердечником индуктивного датчика перемещений подвешен к пружине непосредственно. Такой датчик имеет достаточно низкую точность измерений, которая обусловлена тем, что:

- Пружины обладают известным явлением гистерезиса при сжатии и растяжении и при изготовлении имеют достаточно большой разброс параметров. Согласно [35] пружины первой группы выпускаются с допускаемыми отклонениями на контролируемые силы или деформации $\pm 5\%$;
- Максимально достижимая точность таких плотномеров составляет 2 кг/м^3 , в то время как для коммерческого учета продуктов требуется точность измерения плотности $1\text{-}1,5 \text{ кг/м}^3$.

Плотномеры с плавающим поплавком имеют ключевой недостаток: измерение плотности поверхностного слоя жидкости, которая может отличаться от средней плотности в резервуаре из-за испарения или температурных градиентов. Кроме того, их показания зависят от поверхностного натяжения, изменяющегося под влиянием давления, температуры и смачиваемости, что вносит

дополнительные погрешности. Эти проблемы решаются в плотномерах с поплавками полного погружения, где влияние поверхностных эффектов исключено.

Примером таких устройств являются цепочные плотномеры, в которых поплавков уравнивается цепью, обеспечивая работу в широком диапазоне плотностей [52]. Положение поплавка определяется путем измерения сопротивления жидкости между электродами, связанными с мостовой схемой. Однако этот метод применим только для электропроводящих жидкостей (например, растворов электролитов), так как требует оценки электрической проводимости среды. Для непроводящих жидкостей, таких как нефтепродукты, технология непригодна, что ограничивает ее универсальность. Таким образом, несмотря на устранение погрешностей, связанных с поверхностными явлениями, цепочные плотномеры остаются узкоспециализированным решением.

В конструкциях плотномеров для жидкостей [18, 87] с магнитострикционным преобразованием перемещения поплавка также используются цепочки. Устройство плотномера, представленное на рисунке 1.1, включает тороидальный поплавок из немагнитного материала, внутри которого размещены магниты. Поплавок погружен в жидкость и соединен с уравнивающими цепочками. Перемещение поплавка фиксируется магнитострикционным волноводом, интегрированным в трубчатый корпус. На волноводе расположена катушка считывания, преобразующая изменения магнитного поля в электрический сигнал при смещении поплавка.

Для многоточечных измерений плотности на разных уровнях резервуара (ёмкости) применяют несколько поплавков (n штук), закрепленных на определенных высотах. Такая модульная конструкция позволяет адаптировать прибор под задачи контроля неоднородных сред. Однако использование магнитострикционной технологии ограничивается применением в анализируемых средах, не вызывающих коррозию или налипание на чувствительные элементы.

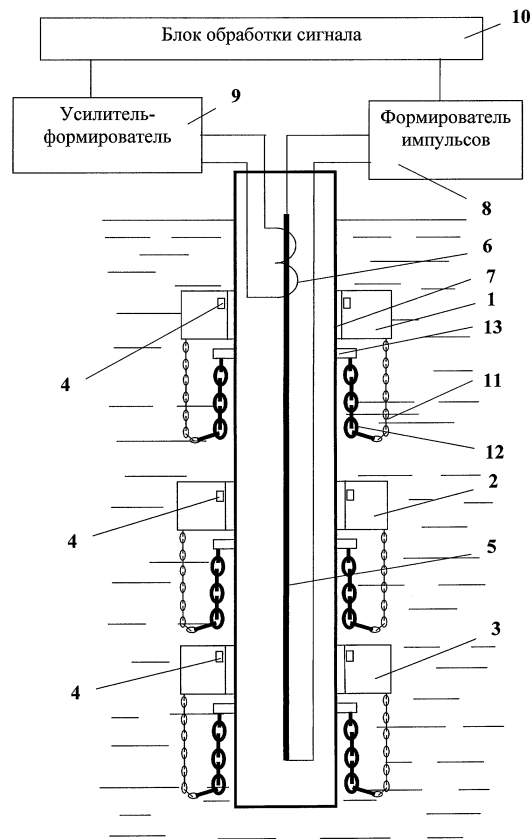


Рисунок 1.1 - Поплавковый плотномер с цепочками

1,2,3 – положения поплавка, 4 – постоянные магниты, 5 – волновод, 6 – катушка считывания, 7 – корпус из немагнитного материала, 8 – формирователь импульсов, 9 – усилитель-формирователь, 10 – блок обработки сигналов, 11 – уравнивающие цепочки, 12 – фиксатор, 13 – крепление фиксатора.

Принцип работы данного плотномера основан на измерении времени прохождения ультразвукового сигнала через магнитострикционный волновод, скорость распространения которого остается стабильной при изменениях давления и влажности, а температурные колебания компенсируются алгоритмами обработки данных. Низкое рабочее напряжение и малые токи обеспечивают взрывобезопасность, что позволяет применять устройство в таких средах, как нефтепродукты или сжиженные газы, а высокая помехоустойчивость делает его надежным в условиях электромагнитных помех. Однако разрешающая способность прибора имеет дискретный характер, определяемый размерами феррито-полупроводниковых элементов и расстоянием между ними: для достижения

погрешности 0,1% при перемещении поплавка на 10 см требуется 1000 элементов размером 0,1 мм, что технически нереализуемо на текущем этапе [18]. Кроме того, ограниченная рабочая зона, зависящая от длины измерительного элемента, вынуждает использовать крупногабаритные поплавки с большим количеством уравнивающих цепочек или изготавливать компоненты из тяжелых сплавов, таких как платиноиридиевые, что значительно увеличивает стоимость конструкции. Эти технологические и экономические ограничения сужают область практического применения устройства, несмотря на его инновационность, и требуют дальнейших разработок для повышения точности и снижения затрат.

Серьезным недостатком магнитострикционного преобразователя является узкий температурный диапазон, связанный с потерей магнитных свойств используемых материалов как при низких (ниже минус 60°), так и при высоких температурах (выше 100°C). Это существенно ограничивает их область применения, например, для измерения плотности сжиженных газов и высокотемпературных смесей в процессе процессов нефтепереработки. Стоит отметить также подверженность данного типа плотномеров воздействию магнитного поля, что может исказить результат измерения.

Поплавковые плотномеры с магнитострикционным преобразователем также бывают с одиночными поплавками и без уравнивающих элементов. Среди серийно выпускаемых плотномеров с таким типом преобразователя в основном встречаются плотномеры в составе магнитострикционных поплавковых уровнемеров, где поплавок преобразователя плотности устанавливается дополнительно к поплавку преобразователя уровня. В качестве успокоителя при вибрациях и волнениях среды в таких датчиках дополнительно применяется демпферная труба.

Поплавковые плотномеры в составе поплавкового уровнемера (Рисунок 1.2) с магнитострикционным преобразователем выпускаются фирмами НПП «Сенсор» и НТФ «Новитех» в составе измерительных систем Струна+. Такие датчики имеют громоздкую конструкцию вследствие необходимости соответствия длины направляющей высоте ёмкости с контролируемой средой, ограниченный ход

поплавка и, как следствие, небольшой диапазон измеряемой плотности для одного поплавка, сложные преобразование величин и зависимость между ними, а также трудоемкий расчет искомых параметров относительно друг друга.



Рисунок 1.2 - Уровнемер-плотномер ПМП-201 НПП «Сенсор» с поплавками уровня, плотности и раздела фаз.

Во многих плотномерх поплавкового типа используется тензометрический преобразователь силы натяжения нити, пропорциональной плотности жидкой среды. Такой датчик плотности, изображенный на рисунке 1.3 включает поплавок, подвешенный на нити, прикрепленной к измерительной головке. Согласно полезной модели [70] датчик дополнительно включает полую штангу, внутри которой расположена нить соединяющая поплавок с измерительной головкой. Измерительная головка снабжена магнитным предохранителем для ее защиты от случайных перегрузок. Поплавок закреплен внутри защитного кожуха, в нижней части которого установлен штыревой упор.

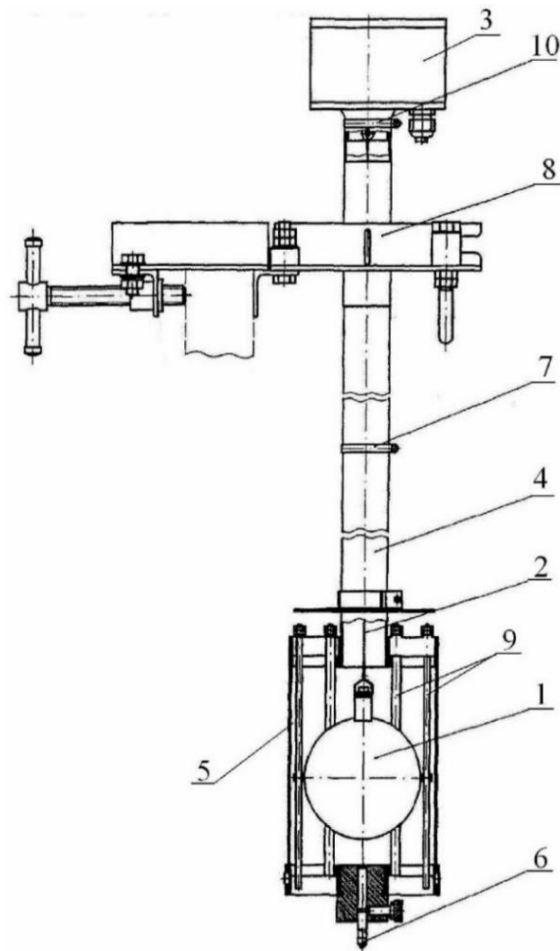


Рисунок 1.3 - Ареометрический плотномер

1 – поплавок, 2 – нить, 3 – измерительная головка, 4 – полая штанга, 5 – защитный кожух, 6 – штыревой упор, 7 – транспортный хомут, 8 – кронштейн, 9 – направляющие, 10 – крепежный хомут.

Поплавок погружен в контролируемую жидкость и соединен с измерительной головкой длинной тонкой нитью. В измерительной головке находится тензопреобразователь веса и плата электроники, преобразующая измеренный вес поплавка в цифровой код, пропорциональный весу. Точность показаний датчика, прежде всего, зависит состояния поплавка, который должен находиться в свободно подвешенном состоянии, быть полностью погруженным в жидкость и на нем не должно образовываться дополнительной массы, существенно снижающей точность измерения плотности жидкости. Также следует не допускать попадания грязи во внутреннюю полость измерительной головки.

Все поплавковые плотномеры с тензометрическим преобразователем имеют аналогичную конструкцию. Отличительными чертами является форма и конструкция поплавка, наличие либо отсутствие защитного кожуха вокруг нити, а также материал и длина нити. Такие датчики могут работать в широком диапазоне измерения плотности жидких сред от 800 до 2500 кг/м³, при температуре от минус 50 до 85°C и относительной влажности до 95%. Конструкция проста в изготовлении.

Недостатками данного датчика являются:

- Низкая надежность и точность вследствие возможности обрыва нити из-за перегрузки, а также поломки тензометрического преобразователя;
- Отсутствие стабилизации поплавка в измерительной среде, что приводит к уменьшению быстродействия и увеличению погрешности вследствие волнений и движения жидкости при сливе и наливе, вибраций и прочих факторов. Для стабилизации могут применяться дополнительные устройства - успокоители, что приводит к усложнению конструкции и увеличению ее размеров;
- Диапазон рабочих температур делает невозможным использование данного плотномера для измерения плотности многих высокотемпературных жидкостей, характерных для процессов нефтепереработки.

Поплавковые плотномеры с тензометрическим преобразователем выпускаются компанией «Союзцветметавтоматика» (Россия).

Ниже приведена таблица 1.5 со сравнительными характеристиками выпускаемых поплавковых плотномеров российского производства.

Таблица 1.5 – Сравнительные характеристики выпускаемых стационарных поплавковых плотномеров

Производитель	Вид преобразователя	Диапазон измерений, кг/м ³	Абсолютная погрешность, кг/м ³	Приведенная погрешность, %	Рабочая температура, °С
ПМП-201 (Россия)	Магнитострикционный	450-1500 (с поддиапазонами не более 130)	1; 1,5; 2,5 в зависимости от контролируемой среды	Не более 2	минус 50 ... 60
ППП КШЮЕ.407533 (Струна+) (Россия)	Магнитострикционный	450-1500 (с поддиапазонами не более 150)	0,5; 1,5 в зависимости от контролируемой среды	Не более 1	минус 40...55
П1 (Россия)	Тензометрический	500-2000 (с поддиапазонами не более 150)	3	Не более 2	5...50
Плотномер ТМ-1 (Россия)	Тензометрический	500-2500 (с поддиапазонами не более 200)	1	Не более 0,5	минус 10...50

Из сравнительной таблицы видно, что номенклатура выпускаемых поплавковых плотномеров достаточно невелика. Несмотря на достаточно широкий диапазон плотности анализируемых жидкостей, представленные плотноммеры могут применяться только в достаточно узких поддиапазонах измерения плотности, ориентированных на определенный продукт. Также стоит отметить сравнительно невысокую точность и малый диапазон рабочих температур, который не подходит для большинства процессов нефтепереработки и нефтехимии.

1.4 Анализ существующих информационно-измерительных систем для определения плотности нефти и нефтепродуктов

На данный момент наблюдается достаточно ограниченное количество существующих ИИС для определения плотности нефти и нефтепродуктов отечественного производства. Все существующие ИИС подразумевают измерение

плотности как сопутствующего параметра наряду с измерением уровня, температуры и границы раздела фаз, целью измерения которых является определение и расчет массы и объема нефти или нефтепродукта в ёмкости или резервуаре. В некоторых случаях измерение плотности вовсе не предусмотрено, а данный параметр определяется с помощью функциональной зависимости от прочих измеренных параметров, что может вносить неточность и недостоверность в полученную информацию о величине искомого параметра.

Наиболее распространенной является разработанная НТФ «Новинтех» измерительная система «Струна+» предназначена для измерения уровня, температуры, плотности, вычисления объёма, массы светлых нефтепродуктов и сжиженного газа (СУГ) в емкостях и резервуарах на объектах нефтебаз, АЗС, АГЗС и других промышленных предприятиях (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Датчики ИИС «Струна+»

Система является модульной и собирается под потребности потребителя и требования к измерению того или иного параметра. Стандартно система включает в себя поплавки измерения уровня, а установка поплавка измерения плотности и поплавка раздела фаз является дополнительной опцией. Каждый первичный преобразователь параметров (ППП) может содержать в себе до 7 поплавков

плотности в зависимости от высоты ёмкости. В данной ИИС используется поплавковый плотномер полного погружения цепочного типа с магнитострикционным преобразователем, который обладает всеми недостатками такого типа преобразователей, описанных в пункте 1.4. Данный плотномер имеет ограниченный ход поплавка и, как следствие, малый диапазон измерения, что ограничивает область их применения, либо требует установки дополнительных поплавков на штанге. Требуется априорное знание типа исследуемой жидкости в ёмкости и диапазон колебания значений плотности исследуемого продукта, так как у каждого датчика имеется относительно малый поддиапазон измерения плотности, влияющий в том числе и на конструктивные особенности, и на особенности его установки, что делает датчики данного типа не универсальными. К недостаткам также относятся наличие элементов электрических цепей и электрических составляющих в измерительной среде или в непосредственной близости к ней, большие габариты датчика, зачастую длина штанги для установки поплавков соответствует высоте ёмкости, то есть может составлять до 18 м. Существенным недостатком является сложность преобразований перемещения поплавка в параметр плотности, так как измеряется положение поплавков плотности относительно положения поплавка уровня, что вносит дополнительную неточность. При отсутствии поплавка плотности данный параметр вычисляется с помощью ряда функциональных зависимостей зачастую вручную.

Другая автоматизированная информационно-измерительная система, разработанная на базе НПФ «Круг», применяется для учета нефти и нефтепродуктов в резервуарах на Туапсинском НПЗ. Данная система включает в себя каналы измерения уровня, температуры и плотности. Датчик уровня Proservo NMS5 фирмы Endress+Hauser (Рисунок 1.5) предназначен также для измерения плотности, и представляет собой датчик буйкового типа с преобразователем угла поворота штанги в зависимости от измеряемых уровня и плотности.



Рисунок 1.5 - Датчик уровня и плотности Proservo NMS5

К недостаткам данной системы можно отнести недостаточную точность измерения плотности жидкой среды (абсолютная погрешность составляет 5 кг/м^3), подверженность влиянию турбулентности и вибрациям, а также максимальная рабочая температура 50°C , что непригодно для большинства высокотемпературных процессов нефтепереработки. Также недостатком можно считать, что система построена на основе датчиков зарубежного производства, что в настоящее время затрудняет их закупку, обслуживание и ремонт, а также увеличивает стоимость системы и ее внедрения.

Еще одна система КомпАС производства CIS-Controls базируется на измерении уровня и температуры, а также может производить измерения плотности с помощью дополнительного подключения датчика КомпАС-ПЛ вибрационного принципа действия. Данный датчик плотности имеет достоинства и недостатки вибрационных плотномеров, приведенных в разделе 1.2. Также к недостаткам можно отнести достаточно высокую погрешность (до $2,5 \text{ кг/м}^3$) и наличие электрической составляющей в непосредственной близости к рабочей пожароопасной среде.

Анализ существующих ИИС, позволяющих определять плотность жидких сред, показал, что измерение плотности в таких системах является второстепенной

и не всегда обязательной задачей, несмотря на то что плотность является одним из важнейших параметров качества нефти и нефтепродуктов, а также корректности протекания технологического процесса. В основном плотность измеряется с помощью датчика уровня либо относительно показаний датчика уровня, что приводит к дополнительным погрешностям, так как имеют место пересчетные функциональные зависимости, в некоторых случаях выполняемые вручную. Также стоит отметить, что рабочие температурные диапазоны существующих ИИС не соответствуют высокотемпературному характеру большинства технологических процессов нефтепереработки, что делает данные ИИС пригодными лишь для процессов хранения нефти и нефтепродуктов. Среди рассмотренных ИИС наибольшее распространение получила лишь система «Струна+», остальные ИИС применяются на одном – двух предприятиях, что, возможно, говорит об их узконаправленности. Также наблюдается отсутствие рациональных решений для создания распределенных систем измерения плотности пожароопасных сред в нескольких емкостях, удаленных друг от друга на значительные расстояния.

1.5 Оценка перспективности внедрения волоконно-оптических датчиков и систем измерения плотности пожароопасных жидкостей

К современным информационно-измерительным системам (ИИС) предъявляется целый ряд требований, включая улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик, уменьшение габаритов и массы устройств, повышение их прочности и устойчивости к внешним воздействиям, а также обеспечение взрывопожаробезопасности. Эти требования обусловлены необходимостью повышения эффективности, надежности и безопасности производственных процессов, особенно в таких отраслях, как нефтепереработка.

Одной из актуальных задач дальнейшего развития и совершенствования ИИС в нефтеперерабатывающей отрасли является более широкое

внедрение оптоволоконных технологий в качестве основы для датчиков и измерительных систем [26]. Оптоволоконные датчики обладают рядом преимуществ, таких как: высокая точность измерений, устойчивость к электромагнитным помехам, возможность работы в агрессивных и взрывопожароопасных средах, компактность и легкость конструкций, долговечность и минимальные требования к обслуживанию.

Использование оптоволоконных технологий позволяет создавать более надежные и безопасные системы, способные оперативно и точно контролировать ключевые параметры технологических процессов, что особенно важно в условиях повышенных требований к качеству продукции и безопасности производства [26].

Перспективные разработки в области создания ВОИИС и волоконно-оптических датчиков для измерения различных параметров ведутся такими мировыми компаниями как Siemens, Micron Optics, CiDRA и др. В России активно ведутся разработки и модернизация волоконно-оптических систем, включая их компоненты и технологии производства оптических волокон. Внедрение волоконно-оптических информационно-измерительных систем (ВОИИС) расширяет возможности мониторинга в экстремальных условиях - под воздействием радиации, сильных электромагнитных помех, в зонах с риском взрыва или воспламенения. Ключевым элементом ВОИИС является оптоволоконный кабель, который обеспечивает устойчивость к электромагнитным полям, исключает перекрестные помехи в многожильных кабелях и снижает энергопотребление. Его конструкция исключает искрообразование, что критически важно для взрывоопасных сред, а высокая устойчивость к агрессивным воздействиям, прочность, малый вес и простота мультиплексирования сигналов [6, 83] делают его универсальным решением.

Волоконно-оптические датчики, интегрированные в ВОИИС, отличаются абсолютной искро- и взрывобезопасностью, что позволяет их использовать во взрывоопасных зонах. Их преимущества включают механическую прочность, компактность, надежность и применение диэлектрических материалов, исключающих наличие электрического тока в зоне измерений. Устройства

устойчивы к экстремальным температурам, вибрациям, ударам и другим негативным факторам, а также поддерживают бесконтактные и дистанционные измерения, что позволяет применять их в ситуациях, где традиционные методы недоступны из-за технических или экологических ограничений [6]. Таким образом, ВОИИС становятся перспективным инструментом для решения задач, требующих высокой точности и безопасности в сложных эксплуатационных условиях.

Таким образом, ВОИИС представляют собой перспективное решение для современных измерительных задач, особенно в условиях, где традиционные методы измерения оказываются недостаточно эффективными или безопасными. Их внедрение позволяет повысить точность, надежность и безопасность измерений, что особенно важно в таких отраслях, как нефтепереработка, химическая промышленность и энергетика.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) и информационно-измерительные системы обеспечивают повышенную безопасность при эксплуатации благодаря отсутствию электрических цепей и источников питания в зоне измерения. Согласно исследованиям [6], использование световой энергии мощностью до 1 мВт гарантирует безопасность работы даже в условиях повышенной пожаро- и взрывоопасности, что говорит о возможности применения их в нефтегазовой, химической и других отраслях с высоким уровнем пожаро- и взрывоопасности.

Применение волоконно-оптических датчиков и волоконно-оптических информационно-измерительных систем делает возможным создание распределенных систем измерения со значительными расстояниями (до 1 км) между отдельными устройствами с передачей данных по единому волоконно-оптическому кабелю. Создание распределенных волоконно-оптических информационно-измерительных систем наиболее актуально для объектов добычи, транспорта и переработки нефти, природного газа и их производных.

В настоящее время наблюдается проблема отсутствия достаточной номенклатуры волоконно-оптических датчиков и измерительных систем. Основным ограничивающим фактором их создания и внедрения являются недостаточные темпы в области их разработки, а также недостаточная

номенклатура элементов и комплектующих для создания таких систем. В то же время потребность в волоконно-оптических датчиках и измерительных системах довольно высокая из-за ряда их неоспоримых достоинств, особенно на объектах нефтегазоперерабатывающей и нефтегазодобывающей промышленности, химической промышленности, металлургии, ТЭК и авиастроении. Поэтому создание новых решений волоконно-оптических датчиков и волоконно-оптических измерительно-информационных систем (ВОИИС) для контроля различных физических величин и параметров сред, а также разработка сигнализаторов и систем противоаварийной защиты остается важной и актуальной задачей [21].

Таким образом, исходя из проведенного анализа, основными требованиями к предмету исследований являются:

- обеспечение интегрированного в технологический процесс непрерывного контроля плотности жидких пожароопасных сред;
- легкость и простота конструкции датчика и преобразователя, их установки и эксплуатации, а также малые габариты;
- доступность элементов и комплектующих, материалов и технологий изготовления;
- простота преобразования измерительной информации;
- возможность применения во взрывопожароопасных средах, отсутствие электрических элементов в непосредственной близости к анализируемой среде;
- обеспечение погрешности не более, чем у существующих выпускаемых поплавковых датчиков и информационно-измерительных систем для определения плотности пожароопасных жидкостей;
- диапазон рабочих температур, соответствующий требованиям основных технологических процессов нефтепереработки, транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов.

Основные выводы и результаты

1. Теоретическая проработка и анализ предметной области и существующих методов измерения плотности жидкости, в частности нефти и нефтепродуктов, показали, что в настоящее время для измерения плотности жидких сред в основном используются лабораторные методы измерения плотности, такие как ареометрический и пикнометрический. Среди средств непрерывного измерения плотности в емкостях наблюдается дефицит универсальных, конструктивно простых, малогабаритных средств измерения, обеспечивающих необходимую точность, простоту преобразований, а также возможность оперативного контроля параметра в промышленных условиях в искро-взрыво-пожароопасных жидких средах.

2. Рассмотрены основные технические решения поплавковых датчиков плотности жидких сред. Выявлено, что среди выпускаемых поплавковых плотномеров для непрерывного контроля параметра в промышленных условиях наиболее применимы плотномеры с магнитострикционным и тензометрическим преобразователями. Однако имеющиеся решения не обеспечивают простоты и легкости конструкции и эксплуатации, работоспособности в высокотемпературных условиях, надежности и точности, а преобразование и расчет искомой величины является достаточно трудоемким. Также стоит отметить наличие электрических элементов в области измерений у некоторых образцовых датчиков, что может послужить причиной возникновения взрыво- и пожароопасных ситуаций.

3. Проведен анализ существующих отечественных ИИС, позволяющих определять плотность нефти и нефтепродуктов в емкостях и резервуарах, который показал, что в настоящее время наблюдается дефицит универсальных и широко распространенных ИИС, одной из основных задач которых является конструктивная и эксплуатационная простота определения плотности пожароопасных жидкостей при высокотемпературном характере технологических процессов нефтепереработки.

4. Рассмотрена возможность применения оптоволоконных технологий для разработки волоконно-оптических датчиков и волоконно-оптических информационно-измерительных систем. Приведены основные преимущества применения волоконно-оптических датчиков и измерительных систем для измерения различных параметров. Выявлено, что в настоящее время наблюдается дефицит разработок и исследований в области волоконно-оптического приборостроения, а также недостаточная номенклатура элементов и комплектующих для их разработки, несмотря на то что существует потребность в волоконно-оптических датчиках и измерительных системах из-за ряда их преимуществ во многих отраслях промышленности.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД

2.1 Описание измерительного преобразователя в составе датчика плотности жидких сред

Предлагается использовать поплавковый метод измерения плотности жидких сред как один из самых простых, безопасных, легко реализуемых и точных среди прочих методов измерения плотности жидких сред. Однако измерение плотности жидкости с использованием поплавковых устройств часто сопряжено с трудностями. Колебания поплавка, вызванные изменением плотности, из-за низкого трения между жидкостью и поплавком затухают очень медленно. Это делает процесс измерения недостаточно точным и усложняет получение достоверных результатов. Поэтому возникает проблема максимально быстрого устранения колебаний поплавка и приведения его в состояние равновесия, решение которой достигается путем применения сильфонной подвески поплавка. Сильфоны в качестве компенсатора колебаний обладают рядом преимуществ по сравнению с существующими пружинными компенсаторами, такими как: сжатие и растяжение на значительную длину (до 70% от исходной) без потери упругих свойств; изолированная от внешней среды внутренняя полость, что критично при работе с агрессивными средами; линейность характеристик в широком диапазоне перемещений, меньший гистерезис; устойчивость к коррозии, высоким температурам и давлению; отсутствие трущихся элементов и равномерное распределение деформаций, что увеличивает срок службы.

Измерительный преобразователь разработанного датчика плотности жидких сред (Рисунок 2.1) представляет собой оптико-механическую систему и включает в себя поплавок 1, полностью погруженный в измерительную среду, закрепленный сверху и снизу на сильфонах 2 одинаковой жесткости и присоединенный к стенке емкости 3 с помощью кронштейнов 4. К поплавку крепится шток-толкатель 5

жёстко соединенный с растровой решеткой из диоксида кремния 6. Пропорционально плотности жидкости поплавков перемещается вертикально и через шток-толкатель перемещает растровую решетку [2, 3, 24, 27].

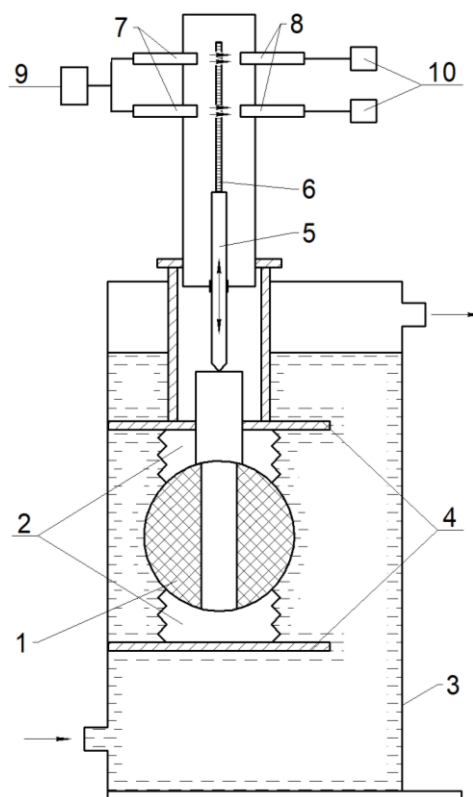


Рисунок 2.1 - Измерительная часть датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем

Растровая решетка пропускающего типа (Рисунок 2.2) имеет чередующиеся поглощающие и пропускающие излучение ИК-спектра области шириной 8 мкм, которые в результате перемещения попеременно поглощают и пропускают световой поток от подводящих оптических волокон 7 к отводящим оптическим волокнам 8. В качестве источника ИК-излучения, вводимого в подводящее оптоволокно, используются светодиоды 9, в качестве приемника излучения, поступающего от отводящего оптоволокна, используются фотодиоды 10 [2, 24, 27].

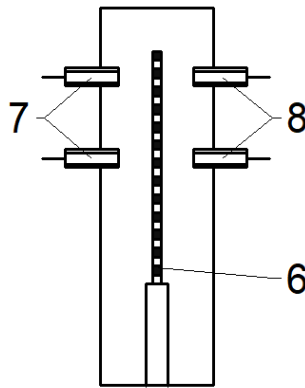


Рисунок 2.2 - Устройство волоконно-оптического растрового преобразователя перемещений (плотности)

На основе предложенного измерительного преобразователя в составе датчика плотности жидких сред разрабатывается структура волоконно-оптической информационно-измерительной системы (ВОИИС) для определения плотности пожароопасных жидкостей. Данная конструкция датчика плотности позволяет обеспечить интегрированный в технологический процесс непрерывный контроль плотности в режиме реального времени без дополнительного отбора проб анализируемой жидкости и применения лабораторных исследований.

2.2 Математическое моделирование физических процессов, происходящих в механической системе измерительного преобразователя плотности

Основной частью измерительного преобразователя является полностью погруженный в жидкость поплавков, закрепленный на двух сильфонах сверху и снизу, соединенный со штоком-толкателем [2, 3, 24]. На любое тело, погруженное в жидкую среду действует сила Архимеда, которая направлена всегда противоположно силе тяжести, поэтому вес тела в жидкости или газе всегда меньше веса этого тела в вакууме. Величина этой силы определяется по закону Архимеда, который гласит, что на тело, погружённое в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненного вещества:

$$F_A = \rho g V,$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, V – объем погруженного тела.

Для упрощения процесса получения функции преобразования плотности жидкости воспользуемся законами физики и примем положение равновесия поплавка за начальную точку отсчета его перемещения (Рисунок 2.3).

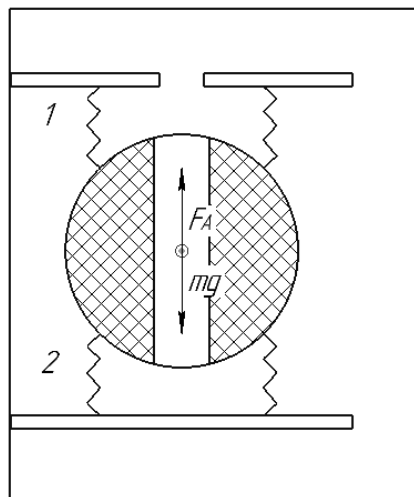


Рисунок 2.3 - Поплавок в положении равновесия

1, 2 – сильфоны, F_A – сила Архимеда, mg – сила тяжести

На поплавок в состоянии равновесия действуют две равные противоположно направленные силы – сила тяжести погруженного тела и сила Архимеда (выталкивающая сила жидкости). Условие плавания тела внутри жидкости в состоянии равновесия запишется следующим образом:

$$F_A = mg.$$

Учитывая, что масса тела m включает в себя массу поплавка $m_{\text{п}}$ и массу стержня $m_{\text{ст}}$, то:

$$\rho g V = (m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})g,$$

$$\rho V = m_{\text{п}} + m_{\text{ст}}.$$

При уменьшении плотности жидкости равновесие сил нарушается и соответственно поплавок движется вниз до тех пор, пока действующие на него силы не уравновесят друг друга (Рисунок 2.4). Следует учитывать, что при

перемещении поплавок на него начинает действовать сила упругости двух сильфонов, которая возникает при их деформации и стремится вернуть их в исходное состояние.

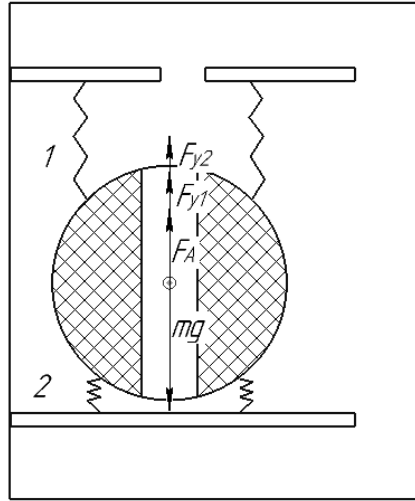


Рисунок 2.4 - Случай перемещения поплавка вниз

1,2 – сильфоны, F_A – сила Архимеда, mg – сила тяжести, F_{y1}, F_{y2} – силы упругости сильфонов.

Сила упругости сильфонов пропорциональна их удлинению и направлена противоположно направлению перемещения частиц сильфонов относительно других частиц при деформации. Верхний сильфон растягивается под весом поплавка, поэтому его сила упругости F_{y1} направлена вверх, противодействуя растяжению. Нижний сильфон наоборот сжимается под весом поплавка, и его сила упругости F_{y2} так же направлена вверх, противодействуя сжатию. Учитывая, что сильфоны можно рассматривать как пружины с жесткостью k , условие равновесия сил в жидкости с меньшей плотностью при смещении поплавка вниз запишется следующим образом:

$$F_A + F_{y1} + F_{y2} = mg,$$

$$\rho g V + k_1 x_0 + k_2 x_0 = (m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})g,$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты жесткости сильфонов, x_0 – величина перемещения поплавка относительно положения равновесия.

Коэффициент жесткости сиффона может быть рассчитан по следующей формуле [85, 86, 91]:

$$k = \frac{\pi E \delta^3}{3(1 - \mu^2) n D_{\text{ср}}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{t}{D_{\text{ср}}}\right)^2}},$$

где E – модуль Юнга (нормальной упругости) материала сиффона;

δ – толщина стенки сиффона;

t – шаг гофрировки;

μ – коэффициент Пуассона;

$D_{\text{ср}}$ – средний диаметр сиффона;

n – количество гофр.

Принимая во внимание то, что оба сиффона имеют одинаковые коэффициенты жесткости и смещаются на одинаковое расстояние, то условие равновесия сил при погруженном поплавке запишется:

$$\rho g V + 2kx_0 = (m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})g.$$

При увеличении плотности жидкости поплавков аналогичным образом движется вверх. Соответственно, направление действия сил упругости сиффонов изменится (Рисунок 2.5).

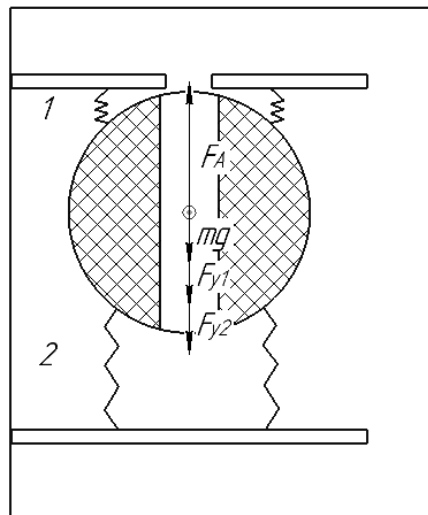


Рисунок 2.5 - Случай перемещения поплавка вверх

1,2 – сиффоны, F_A – сила Архимеда, mg – сила тяжести, F_{y1}, F_{y2} – силы упругости сиффонов.

Условие равновесия сил при нахождении поплавка в жидкости с большей плотностью при смещении поплавка вверх запишется следующим образом:

$$F_A = mg + F_{y1} + F_{y2},$$

$$\rho g V = (m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})g + 2kx_0.$$

Учитывая оба случая, получим уравнение плотности жидкости:

$$\rho = \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})g + 2k|x_0|}{Vg}.$$

Преобразовав выражение, получим:

$$\rho = \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V} + \frac{2k}{Vg}|x_0|.$$

Знак модуля указывает на то, что перемещение x_0 может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от направления движения поплавка (вверх или вниз). Из последнего выражения видно, что плотность жидкости прямо пропорциональна перемещению поплавка под действием этой плотности.

Раскроем знак модуля:

$$\rho = \begin{cases} \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V} + \frac{2k}{Vg}x_0, & \text{если } x_0 > 0, \text{ то есть поплавок движется вверх;} \\ \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V} - \frac{2k}{Vg}x_0, & \text{если } x_0 < 0, \text{ то есть поплавок движется вниз.} \end{cases}$$

Таким образом, после измерения перемещения поплавка под действием некоторой плотности жидкости, необходимо умножить результат измерения перемещения на значение $\frac{2k}{Vg}$ и прибавить значение $\frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V}$, которые являются постоянными величинами для конкретного измерительного преобразователя и зависят от параметров поплавка и стержня штока-толкателя, а также от жесткости сильфонов. В результате будет получено искомое значение плотности жидкости [22].

Данное утверждение верно, если точкой начала координат принимается условное положение равновесия поплавка (среднее положение) – т.е. нахождение его в таком положении, когда сила Архимеда и сила тяжести равны (Рисунок 2.6,

а). В большинстве случаев расчет из данной позиции не удобен для дальнейшего преобразования измеренной величины.

Для простоты расчетов и преобразования наиболее удобным будет принять точкой начала координат положение поплавка в крайнем нижнем положении, из которого, соответственно, поплавок будет перемещаться вверх и обратно (Рисунок 2.6, б). В обоих случаях система координат выбирается таким образом, что поплавок перемещается по осям x и x_0 .

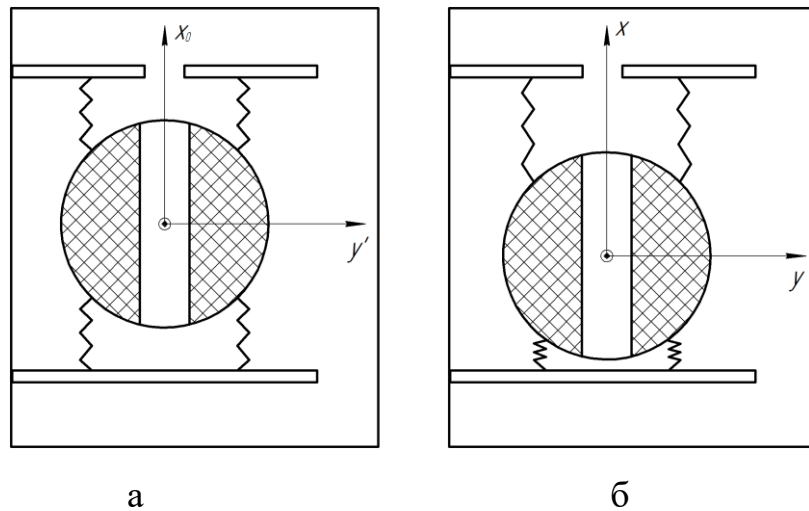


Рисунок 2.6 - Системы координат

а – для поплавка в состоянии равновесия (в среднем положении), б – для поплавка в предельно нижней точке измерения

Соответственно уравнение плотности жидкости в новой системе координат запишется следующим образом [22]:

$$\rho = \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V} + \frac{2k}{Vg}(x - x_0).$$

Для простоты дальнейших преобразований и расчетов вводятся следующие обозначения.

$\rho_{\min} = \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V} - \frac{2k}{Vg}x_0$ – нижний предел измерения датчика; случай, когда поплавок находится в крайнем нижнем положении. Данное значение является постоянной величиной для конкретного измерительного преобразователя и зависит от его конструктивных параметров, таких как масса поплавка, масса стержня, объем поплавка, жесткость сильфонов, величина растяжения и сжатия сильфонов.

$K = \frac{2k}{Vg}$ – коэффициент пропорциональности, позволяющий преобразовать перемещение поплавка в изменение плотности жидкости, вызвавшее данное перемещение. Данный коэффициент также является постоянной величиной для конкретного измерительного преобразователя и зависит от объема поплавка и жесткости сильфонов.

Упрощенное уравнение плотности жидкости имеет вид:

$$\rho = \rho_{min} + Kx,$$

что позволяет судить о линейности функции преобразования.

2.3 Распределение светового потока в оптическом канале измерительного преобразователя плотности жидких сред

2.3.1 Основные сведения о распределении светового потока в волоконно-оптических преобразователях с открытым измерительным каналом

Одним из основных элементов измерительного преобразователя и волоконно-оптической измерительной системы для определения плотности жидких сред, влияющим на его метрологические характеристики, является узел ввода оптического излучения от источника излучения в подводящие оптические волокна, по которым далее световой поток поступает в зону измерения. На эффективность ввода излучения влияют такие параметры источников, как апертура (или диаграмма направленности) и геометрические размеры излучающей области [40].

Основными принципами согласования источника излучения и световода являются: совмещение оптических осей, согласование размеров светового пятна с размерами сердцевины световода, согласование апертуры световода с диаграммой направленности источника излучения. Количество введенной в световод энергии существенно зависит от его числовой апертуры. Так как сердцевина световода захватывает только те лучи, которые заключены внутри конуса с максимальным

углом θ_{NA} , то потери на ввод будут иметь место, если конус излучения источника излучения превышает конус, определяемый числовой апертурой световода (Рисунок 2.7) [5, 6].

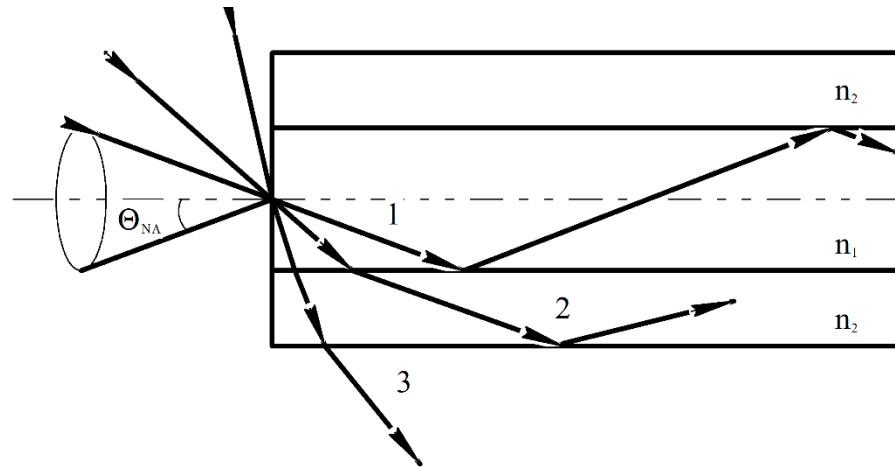


Рисунок 2.7 - Апертурный угол световода

1 – луч, падающий под апертурным углом световода θ_{NA} ; 2, 3 – лучи, падающие под углом, превышающим апертурный угол световода

Для ввода излучения в оптоволоконный световод обычно применяются полупроводниковые устройства, светоизлучающие диоды и инжекционные лазеры. По сравнению с инжекционными лазерами светодиоды имеют более широкий спектр излучения и низкую эффективность ввода излучения в оптическое волокно из-за большего угла расходимости. Но светодиоды имеют и ряд преимуществ, среди которых высокая надежность и большой срок службы, простота изготовления, низкая стоимость. Поэтому они находят широкое применение в качестве источников излучения в информационно-измерительных системах и волоконно-оптических датчиках [83].

Различают светоизлучающие диоды с поверхностным и с торцевым излучением. Диаграмма направленности светодиодов с поверхностным излучением лежит в пределах $120^\circ \dots 180^\circ$, соответственно, эффективность ввода излучения в оптическое волокно будет очень низкая из-за значительного превышения апертурного угла световода. Светодиоды с торцевым излучением

отличаются повышенной мощностью и узкой диаграммой направленности, что значительно повышает эффективность ввода излучения в волоконные световоды. В то время как источники поверхностного излучения (ламбертовские) характеризуются распределением интенсивности по закону $\cos\Theta$, торцевые светодиоды демонстрируют более направленное излучение, описываемое зависимостью $(\cos\Theta)^n$, где $n = 1, 2, \dots$. Это делает их предпочтительными для применений, требующих высокой точности совмещения оптических компонентов, обеспечивая стабильность работы в условиях вибраций или температурных колебаний. [5, 6]. Максимальная эффективность ввода излучения светодиода с поверхностным излучением составляет не более 3%. Потери при вводе излучения в оптоволокно у светодиодов с торцевым излучением на несколько децибел меньше, чем у светодиодов с поверхностным излучением, а эффективность ввода излучения в некоторых случаях может достигать 90% [6].

Из источников [52, 53] известно, что:

- распространение светового потока в каждой точке сердцевины торца ОВ имеет вид телесного угла, как показано на рисунке 2.8, где Θ_{NA} - апертурный угол оптического волокна;
- распространение света во всех направлениях симметричное;
- световой поток состоит из лучей, лежащих в одной плоскости. Данные лучи образуют два множества параллельных лучей [56, 57].

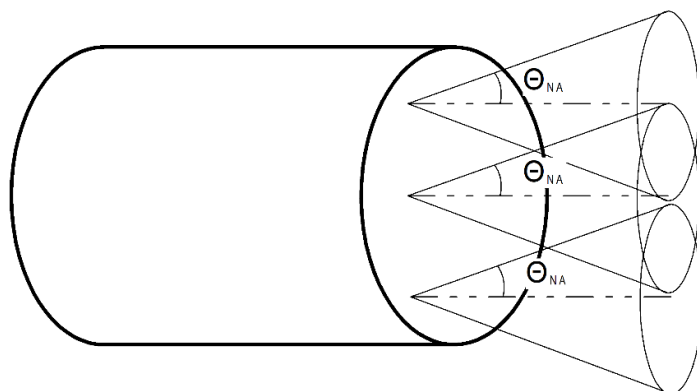


Рисунок 2.8 - Распространение света из точек торца ОВ

Согласно исследованиям [56] модель в некоторой плоскости вид, как представлено на рисунке 2.9), где $x_{кр}$ - дистанция формирования светового пучка, θ_{NA} , d_c – апертурный угол и диаметр сердцевины ОВ соответственно.

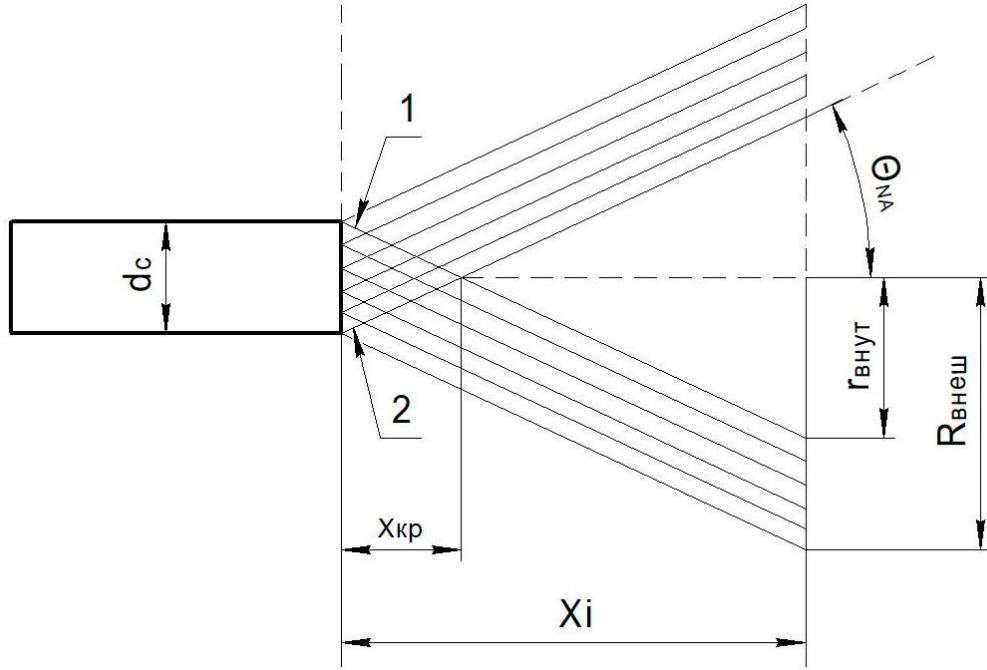


Рисунок 2.9 - Геометрические построения к выводу математической модели распределения светового потока в волоконно-оптическом преобразователе

Распределение интенсивности I_{Xi} в данном случае [65, 67]:

$$I_{Xi} = \begin{cases} I'_{Xi} & r'_{внут} \leq |y| \leq R_{вн} \\ 2I'_{Xi} & |y| < r'_{внут} \end{cases}$$

где I'_{Xi} – интенсивность в любой точке плоскости, параллельной торцу ОВ.

Дистанция формирования светового пучка определяется как [5, 65]

$$x_{кр} = \frac{d_c}{2 \tan \theta_{NA}}$$

Интенсивность I'_{Xi} рассчитывается как освещенность от отдельного луча, прошедшего расстояние $\frac{x_i}{\cos \theta_{NA}}$ [5, 65]:

$$I'_{Xi} = \frac{B \sin^2 \theta_{NA} \cos^2 \theta_{NA}}{X_i^2}$$

где B – яркость излучения, Вт/(см²·ср).

Распределение интенсивности в разных сечениях светового пучка (Рисунок 2.10) в зависимости от X_i согласно [5, 6, 65] имеет вид:

- а) сечение А-А при $0 < X_1 < x_{кр}$ (Рисунок 2.12, а);
- б) сечение Б-Б при $X_2 = x_{кр}$ (Рисунок 2.12, б);
- в) сечение В-В при $X_3 > x_{кр}$ (Рисунок 2.12, в).

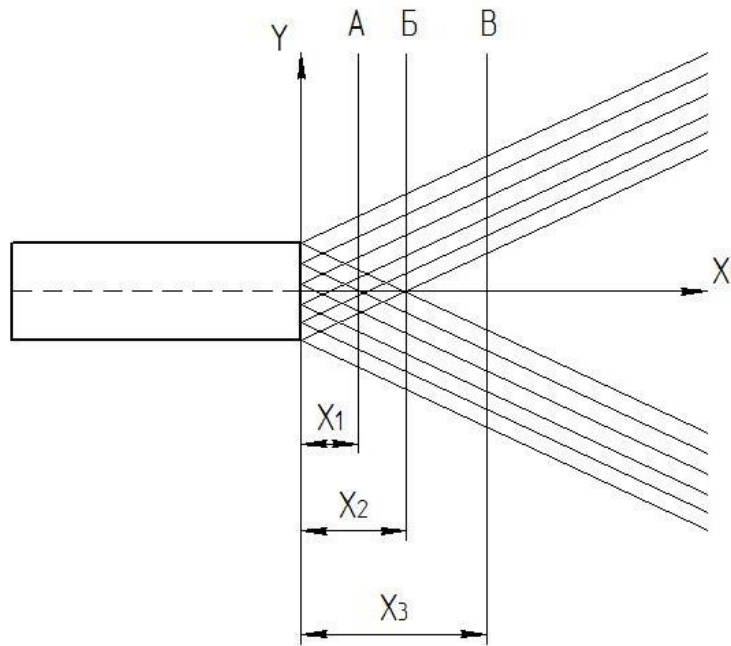


Рисунок 2.10 - Распределение интенсивности в разных сечениях светового пучка

Сечение X_1 показывает распределение интенсивности при $X_i < x_{кр}$. Наблюдается резкий перепад сигнала и неравномерное распределение мощности и интенсивности. Ширина зоны наибольшей интенсивности, будет зависеть от расстояния X_i , и будет тем шире, чем будет ближе находиться к излучающему торцу оптоволокну. Данное сечение не рекомендуется использовать для преобразователей с непрерывной функцией измерения, однако данный участок хорошо подходит для датчиков и сигнализаторов, где требуется резкий перепад сигнала [65].

Сечение X_2 соответствует расстоянию $X_i = x_{кр}$. В данном сечении передаваемая мощность будет практически равна нулю. Участок не пригоден для измерений.

Сечение X_3 соответствует распределению интенсивности при $Xi > x_{кр}$. Распределение имеет наибольшую равномерность, что позволяет исключить нелинейность и ведет к наиболее простым расчетам. Данная область подходит для преобразователей непрерывного типа.

В зависимости от требуемых функций преобразователя определяется взаимное расположение отводящего и подводящего торцов ОВ и модулирующих элементов. Для разрабатываемого волоконно-оптического растрового измерительного преобразователя плотности с открытым оптическим каналом целесообразно расположить модулирующие элементы и отводящее оптическое волокно в зоне $Xi < x_{кр}$ из-за наибольшей интенсивности в данной области и резкого перепада сигнала, так как для дальнейшего преобразования необходимо лишь наличие либо отсутствие сигнала (светового потока) на отводящем торце. Зона $Xi > x_{кр}$ не подходит для рассматриваемого случая, так как в данном сечении наблюдается кольцевая структура светового потока, что для разрабатываемого измерительного преобразователя, его конструкции и дальнейшего преобразования измерительной информации не является целесообразным [25].

Согласно исследованиям [5, 6], на выходе из излучающего торца ОВ сигнал обладает наибольшей мощностью и интенсивностью. С увеличением расстояния Xi относительное значение передаваемой мощности сначала резко уменьшается почти до нуля (такое значение достигается при $Xi = x_{кр}$), затем мощность снова незначительно возрастает. Если плоскость расположена вблизи излучающего торца, то освещенность некоторой площадки на этой плоскости равномерна по всей поверхности [6]. При увеличении расстояния Xi освещенность площадки уменьшается. Поэтому целесообразно расположить диафрагму, решетку и отводящее оптическое волокно как можно ближе к излучающему оптическому волокну в пределах около $1/2Xi$. Критическое расстояние $x_{кр}$ зависит от радиуса сердцевины и апертурного угла оптического волокна.

2.3.2 Модуляция светового потока в открытом измерительном канале волоконно-оптического преобразователя

Управление оптическим потоком в области волоконно-оптического преобразователя осуществляется с помощью различных специальных модулирующих устройств. Наибольший интерес в рамках данного исследования представляют модулирующие устройства, предназначенные для внесения в оптический канал заданного оптического затухания, которые подразделяются на предельные (непрозрачный экран, диафрагма с круглым или прямоугольным отверстием) и поглощающие (светофильтр, поглощающая среда) [65].

Для модуляции светового потока в различных оптических системах широкое применение также нашли растры и растровые решетки. Оптический растр представляет собой периодическую структуру, обладающую различной пропускающей или отражающей способностью. Растровые решетки модулируют световой поток на пути от источника света к приемнику и предназначены для преобразования линейных и угловых перемещений в цифровой код. Растровые решетки являются универсальным инструментом и достаточно распространены в качестве элемента датчиков перемещений оптического типа, так как позволяют добиться высокой точности измерений и обеспечивают линейные характеристики, что упрощает калибровку и повышает стабильность средств измерений в течение длительного времени. Растровые решетки могут изготавливаться с различными параметрами (например, ширина полос), что позволяет легко адаптировать их под требуемый диапазон измерений, а также интегрировать в существующие системы и сочетать с различными видами датчиков. Растровые решетки довольно устойчивы к воздействиям внешней среды, таким как вибрация, температура и пр.

Применение растровых преобразователей позволяют исключить такие недостатки, как влияние нестабильности питающего напряжения (тока) на выходной сигнал датчика; изменение параметров датчика от температуры окружающей среды; зависимость диапазона измеряемых перемещений от габаритных размеров датчика. Основным достоинством применения растровых

преобразователей в составе датчиков является высокая точность измерения в широком диапазоне температур, обусловленная амплитудно-логическим методом обработки выходного сигнала.

На рисунке 2.11 показан случай пропускания светового потока через пропускающий участок решетки. В случае с поглощающей частью решетки световой поток поглощается полностью, соответственно сигнал с отводящего оптического волокна не поступает.

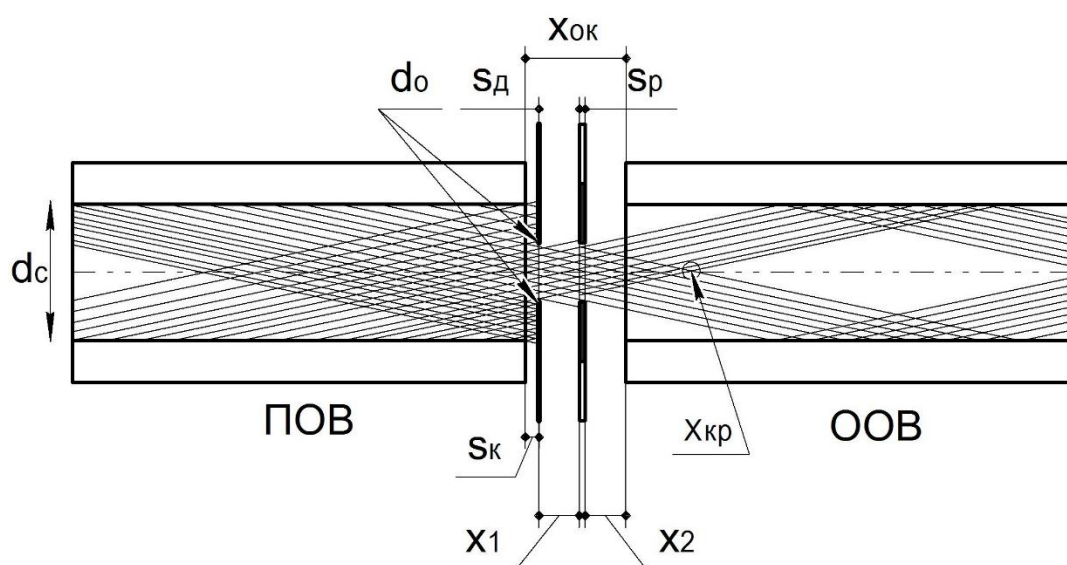


Рисунок 2.11 - Распределение светового потока в открытом канале волоконно-оптического преобразователя

ПОВ – подводящее оптическое волокно, ООВ – отводящее оптическое волокно, d_c – диаметр сердцевины оптоволокна, d_o – диаметр отверстия диафрагмы, $x_{кр}$ – дистанция формирования светового пучка, s_k – толщина клеевого слоя, s_d – толщина диафрагмы, s_p – толщина растровой решетки, $x_{ок}$ – длина открытого оптического канала, x_1 – расстояние между диафрагмой и растровой решеткой, x_2 – расстояние между растровой решеткой и ООВ.

В данном случае используется диафрагма из фольги с круглым отверстием диаметром $d_o=8$ мкм, что минимизирует расходимость и обеспечивает точность направленности светового потока и простоту преобразования и дальнейшего расчета. При прохождении оптического потока от излучающего торца ПОВ через

диафрагму часть оптических лучей отсекается. Остальные оптические лучи попадают на растровую решетку, которая перемещается пропорционально плотности жидкости и имеет пропускающие и поглощающие полосы шириной 8 мкм равной шагу решетки. Соответственно оптические лучи от ПОВ, прошедшие через диафрагму, попадая на решетку либо поглощаются, либо проходят через её пропускающую часть и далее поступают на ООВ.

Важное значение в оптических системах имеет явление дифракции. Понятие дифракции в оптике связано с нарушением прямолинейности распространения света в среде с неоднородностями, такими как отверстия, края экранов и т.д. Согласно скалярной теории дифракции [12] основными методами, применяемыми при численных расчетах, являются приближения Френеля и Фраунгофера, а также метод углового спектра (интеграл Рэлея-Зоммерфельда). Выбор того или иного метода зависит от размеров области анализа и расстояния между отверстием диафрагмы и поверхностью анализа. Стоит отметить, что пределы применения того или иного приближения достаточно условны. Так, для решения задачи дифракции в дальнем поле наиболее применимо приближение Фраунгофера. Решение задачи дифракции в ближнем поле производится посредством приближения Френеля и метода углового спектра. Более строгим в ближнем поле считается метод углового спектра с применением интеграла Рэлея-Зоммерфельда [12]. Данный метод используется при малых расстояниях распространения волнового фронта порядка десятков длин волн.

Распределение электрического поля дифрагирующего света в точке (x, y, z) задается дифракционным уравнением Рэлея-Зоммерфельда [68]:

$$E(x, y, z) = -\frac{i}{\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} E(0, y_0, z_0) \frac{e^{ikr}}{r} \cos\theta dy_0 dz_0,$$

где $E(0, y_0, z_0)$ – начальное поле,

$r = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$ – расстояние от точки в плоскости отверстия диафрагмы до наблюдаемой точки,

i – мнимая единица,

λ - длина волны,

x – ось распространения световой волны,

$\cos\theta = \frac{x}{r}$ – косинус угла между x и r .

На рисунке 2.12 представлен случай распределения светового потока от излучающего торца ПОВ при прохождении через диафрагму с круглым отверстием, где θ – угол дифракционной расходимости, r – расстояние от точки в плоскости отверстия диафрагмы до наблюдаемой точки, d_c – диаметр сердцевины ПОВ, d_o – диаметр отверстия в диафрагме, x – ось распространения световой волны.

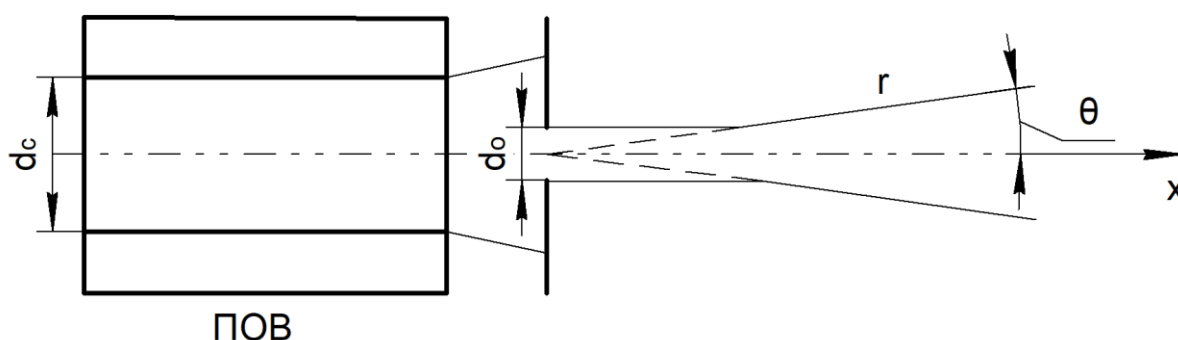


Рисунок 2.12 - Распределение светового потока при прохождении диафрагмы с круглым отверстием

Произведено моделирование случая прохождения светового потока (длина волны $\lambda=850 - 900$ нм) через круглое отверстие диафрагмы диаметром $d_o=8$ мкм (Рисунок 2.13). Расчет производился посредством применения дифракционного уравнения Рэлея-Зоммерфельда при помощи инструментов среды Matlab и языка программирования Python.

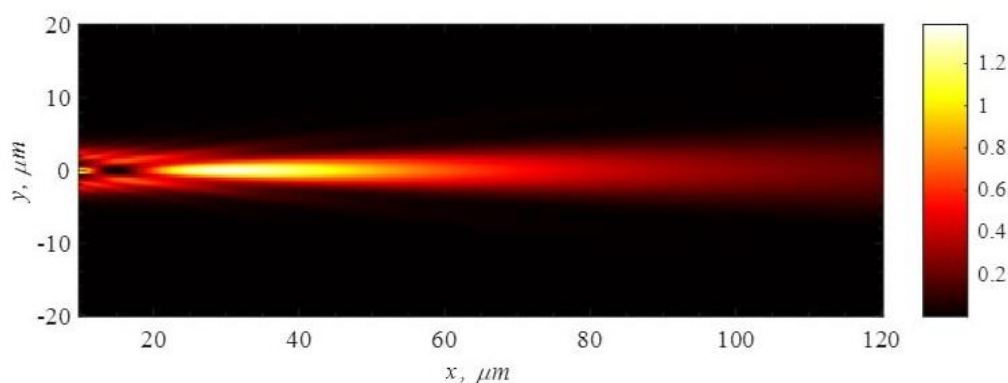


Рисунок 2.13 - Распределение интенсивности излучения при прохождении диафрагмы с круглым отверстием

Из рисунка 2.13 видно, что световой поток после прохождения круглого отверстия диафрагмы достаточно сколлимирован и имеет малый угол дифракционной расходимости. По результатам оценки диаметров полуспада интенсивности в сечениях угол расходимости составил $\theta_{\text{п}}=1,89^\circ$, полный угол дифракции составил $\theta=3,87^\circ$. На расстоянии до 20 мкм от диафрагмы наблюдается сложная дифракционная картина с чередованием темных и светлых колец, при чем центральная зона - темная, соответственно, можно сделать вывод, что данная зона для размещения растровой решетки непригодна. Более целесообразно будет расположить растровую решетку на расстоянии 30 мкм от диафрагмы в области наибольшей интенсивности светового потока.

Количество зон Френеля рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{d_0^2}{4\lambda x},$$

где d_0 – диаметр отверстия в диафрагме, λ – длина волны, x – расстояние от диафрагмы до растровой решетки.

Расчет для области максимальной интенсивности излучения, то есть на расстоянии от диафрагмы $x=30$ мкм показал, что количество зон Френеля составляет $n=0,593$. При $n<1$ отверстие не охватывает полностью всю первую зону, интерференция на краях отверстия диафрагмы не приводит к существенному гашению или усилению света. В таких условиях наблюдается одно яркое пятно с незначительным размытием краев, а сложная структура с чередованием темных и светлых колец отсутствует. Увеличение расстояния x приводит лишь к снижению интенсивности светового потока и яркости пятна, а дифракционные эффекты по-прежнему выражены минимально.

Для оценки размера фокального пятна и интенсивности излучения, попадающего на растровую решетку, были получены сечения на расстоянии $x_1=30$ мкм, $x_2=60$ мкм и $x_3=100$ мкм от диафрагмы, представленные на рисунке 2.14.

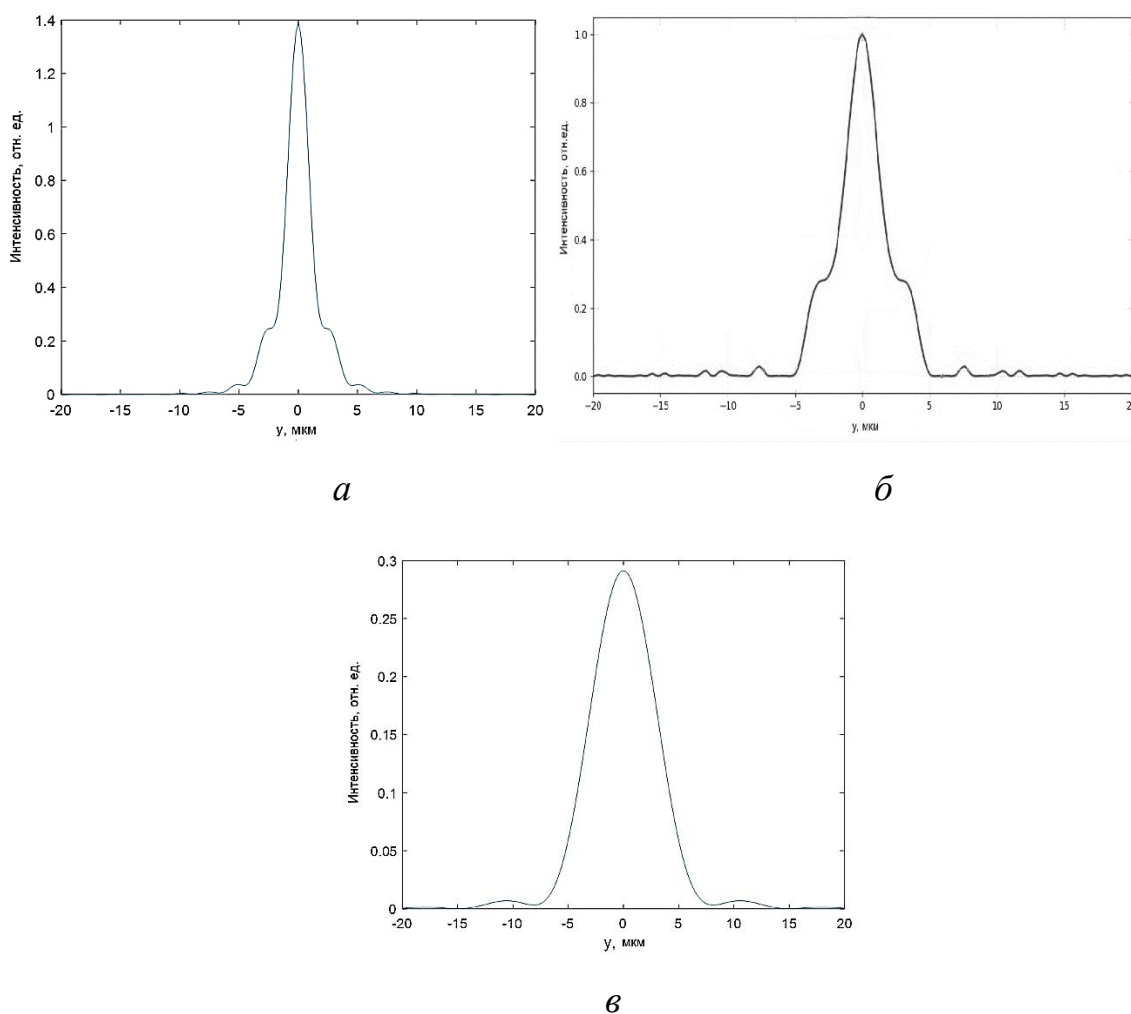


Рисунок 2.14 - Распределение интенсивности в фокальном пятне после прохождения световым потоком диафрагмы с круглым отверстием

В сечении *a* на расстоянии $x_1=30$ мкм от диафрагмы наблюдается максимум интенсивности излучения. Излучение неравномерное, диаметр фокального пятна составляет 8 мкм, однако наблюдается область высокой интенсивности диаметром 4 мкм, за пределами которой интенсивность излучения резко снижается.

В сечении *б* на расстоянии $x_2=60$ мкм от диафрагмы интенсивность излучения ниже, чем в сечении *a*, диаметр фокального пятна составляет около 10 мкм, наблюдается область высокой интенсивности диаметром 6 мкм, границы снижения интенсивности имеют более плавный характер.

В сечении *в* на расстоянии $x_3=100$ мкм от диафрагмы распределение интенсивности более равномерное, областей резкого изменения интенсивности

излучения не наблюдается, однако интенсивность почти в 5 раз ниже, чем в сечении a , что делает затруднительным дальнейшее преобразование светового потока. Диаметр светового пятна составляет 16-17 мкм.

Произведенный расчет, а также результаты моделирования показали, что для фокального пятна на растровой решетке диаметром не более 8 мкм (т.е. не превышающем ширину зоны пропускания или поглощения растровой решетки) необходимо расположить растровую решетку на расстоянии не более 60 мкм, так как при большем расстоянии снижается интенсивность излучения и увеличивается диаметр фокального пятна, что может привести к ложному срабатыванию счетчиков и внести неточность при дальнейшем расчете перемещения растровой решетки. Учитывая, что интенсивность излучения в сечении, соответствующем расстоянию $x_3=100$ мкм от диафрагмы очень мала, а низкая интенсивность излучения наблюдается, начиная с расстояния от диафрагмы $x=85$ мкм, оптимальным решением будет расположить торец ООВ в пределах $x=60\dots 80$ мкм от диафрагмы.

При прохождении световым потоком растровой решетки, на торце ООВ не наблюдается периодических полос, четких минимумов и максимумов, а только центральное пятно с размытыми границами. Это объясняется малыми расстояниями между элементами оптического канала.

Для рассматриваемого случая $d_c=200$ мкм, $\theta_{NA} = 12^\circ$, $s_k=5$ мкм, $s_d=10$ мкм, $s_p=20$ мкм, $x_1=30$ мкм, $x_2=30$ мкм, $x_{ок}=95$ мкм, $x_{кр}\approx 475$ мкм.

Основные выводы и результаты

1. Определены основные составляющие части измерительного преобразователя плотности жидких сред, представляющего собой оптико-механический блок, состоящий из поплавка, сильфонов и волоконно-оптического растрового преобразователя.

2. Произведено математическое моделирование физических процессов, происходящих в механической части измерительного преобразователя.

Рассмотрены силы, воздействующие на поплавки. Получена функциональная зависимость измеряемой плотности жидкости от величины перемещения поплавка и сделан вывод о линейности данной зависимости.

3. Рассмотрены особенности распределения светового потока в открытом оптическом канале волоконно-оптического преобразователя, найдены области наибольшей интенсивности излучения, а также определено оптимальное расстояние для расположения элементов оптического канала преобразователя и отводящего торца ОВ.

4. Рассмотрено влияние дифракции в случае прохождения светового потока через круглое отверстие диафрагмы, а также через прозрачный участок растровой решетки. Получено распределение интенсивности излучения в сечениях светового пучка, выбрано оптимальное расстояние для взаимного расположения элементов волоконно-оптического растрового преобразователя с учетом дифракции.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ И СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Согласно второй главе, разработанный измерительный преобразователь в составе датчика плотности и ВОИИС позволяет определять плотность жидких сред на основании измеренного перемещения поплавка. Существует множество способов измерения перемещения, однако специфика контролируемой среды и процессов в целом говорит о необходимости применения преобразователей, позволяющих обеспечить точность и надежность процесса измерения, а также его безопасность, так как контролируемые жидкие среды обладают легкой воспламеняемостью, а при использовании электрической составляющей вблизи контролируемой среды возможно возникновение искры и, как следствие, аварийных ситуаций.

По этим причинам был сформулирован ряд требований к разрабатываемой информационно-измерительной системе для определения плотности пожароопасных жидкостей, таких как:

1. Процесс измерения плотности жидких сред должен производиться непрерывно в автоматизированном режиме и обеспечивать возможность оперативного своевременного контроля измеряемого параметра.
2. Возможность работы в условиях высоких температур протекания технологических процессов нефтепереработки (до 350°C).
3. Приведенная погрешность измерения плотности не должна превышать приведенную погрешность существующих поплавковых датчиков плотности и систем на их основе, то есть составлять не более 2%.
4. Обязательна возможность калибровки информационно-измерительной системы.

5. Возможность приведения измеренной плотности к стандартным условиям при температуре $\Theta=15^{\circ}\text{C}$ и $\Theta=20^{\circ}\text{C}$ в соответствии с требованиями международных и государственных стандартов для удобства дальнейшего применения и расчетов.

6. Удаленность элементов электрических цепей и устройств обработки и преобразования сигналов и информации от технологических объектов с анализируемой пожароопасной средой. Обеспечение искро- взрыво- пожаробезопасности процесса измерения плотности и эксплуатации ВОИИС.

Согласно данным требованиям, предлагается обобщенная структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, включающая в себя поплавковый датчик плотности с сильфонными элементами и волоконно-оптический растровый преобразователь перемещений поплавка.

3.1 Структура волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Была разработана обобщенная структура ВОИИС для определения плотности жидких пожароопасных сред на основе поплавкового плотномера (Рисунок 3.1).

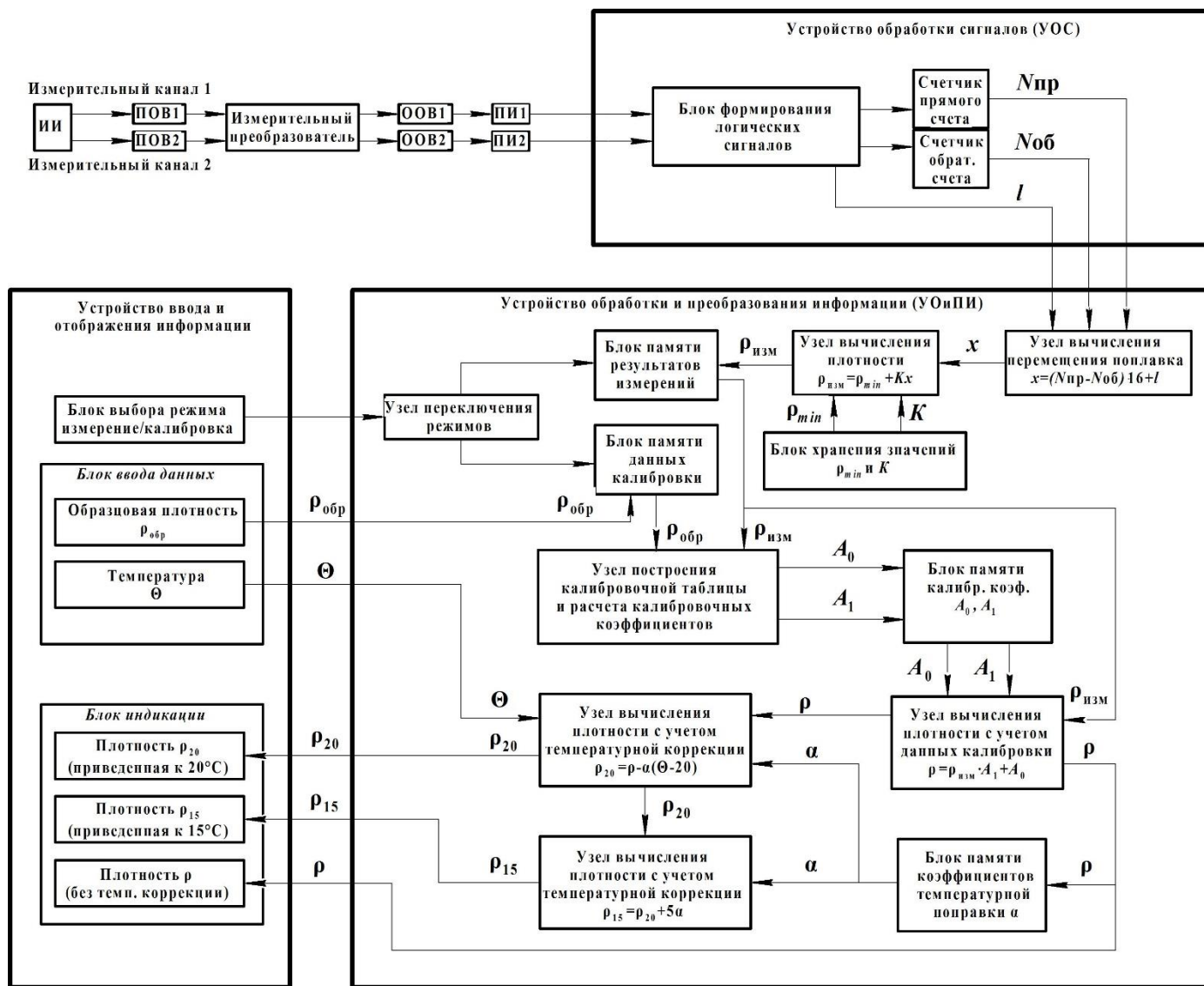


Рисунок 3.1 - Структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей

Волоконно-оптическая информационно-измерительная система, представленная на рисунке 3.1, включает в себя источник излучения (ИИ), две пары подводящих (ПОВ1, ПОВ2) и отводящих (ООВ1, ООВ2) оптических волокон, измерительный преобразователь, устройство обработки сигналов (УОС), информация с которого поступает на устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ), устройство ввода и отображения информации [27].

Измерительный преобразователь включает в себя полностью погруженный в жидкость поплавков, закрепленный сверху и снизу на сильфонах и перемещающийся вертикально пропорционально изменению плотности жидкости совместно с жестко закрепленной к нему растровой линейной решеткой, пересекающей оптическое излучение от подводящих торцов оптоволокон к отводящим. При прохождении излучения через прозрачные участки решетки на выходе приемников излучения формируются электрические импульсы в виде периода синусоиды. Предусмотрено два измерительных канала для того чтобы обеспечить корректный счет импульсов как при прямом, так и при обратном ходе растровой решетки и избежать так называемого дребезга преобразователя - ложного счета, когда количество импульсов при обратном ходе растровой решетки считывается счетчиком как при прямом ходе, то есть возникает неточность определения значения перемещения растровой решетки. Для этого сигналы первого и второго измерительного каналов смещены относительно друг друга на 90° , что упрощает дальнейшее амплитудно-логическое преобразование сигналов и позволяет выполнить корректный счет импульсов как при прямом ходе растровой решетки, так и при обратном [53]. Смещение сигналов измерительных каналов на 90° обеспечивается установкой торцов ПОВ-ООВ первого измерительного канала напротив пропускающего участка растровой решетки, а торцов ПОВ-ООВ второго измерительного канала напротив поглощающего участка растровой решетки. Импульсные сигналы поступают

на входы устройства обработки сигналов (УОС), а именно на блок формирования логических сигналов, который включает в себя компараторы, логический фильтр и электронный нониус, позволяющий определять перемещение поплавка с точностью до 1 мкм. Прямоугольные импульсы (логические «1» и «0») с выхода блока формирования логических сигналов поступают на входы счетчиков прямого и обратного счета. Выходным сигналом электронного нониуса является код, для каждого значения которого соответственно определяется величина перемещения поплавка в мкм. Выходы счетчиков прямого и обратного счета и электронного нониуса являются выходами устройства обработки сигналов (УОС) и входами в устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ).

Устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ) представлено последовательно соединенными узлом вычисления перемещения поплавка, узлом вычисления плотности, узлом построения калибровочной таблицы и расчёта коэффициентов интерполяционного полинома, узлом вычисления плотности с учетом калибровочных коэффициентов, узлами вычисления плотности с учетом температурной поправки. Также предусмотрены блок хранения значений ρ_{min} и K , которые задаются в соответствии с параметрами конкретного датчика в программном коде; блоки памяти результатов измерений и данных калибровки, переключение между режимами осуществляется с помощью узла переключения режимов; блок памяти калибровочных коэффициентов; блок памяти коэффициентов температурной поправки α , которые вносятся в программный код для различных диапазонов измеряемой плотности [27].

Устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ) соединено тремя входами от устройства обработки сигналов (УОС), а также тремя входами и тремя выходами с устройством ввода и отображения информации. УОиПИ вычисляет плотность анализируемой жидкости с учетом данных калибровки, а также плотность, приведенную к стандартным условиям, т.е. к 20°C и к 15°C с учетом коэффициентов температурной

поправки соответственно измеренной плотности. Результаты измерения выводятся на блок индикации, который является частью устройства ввода и отображения информации. В устройство ввода и отображения информации помимо блока индикации также входят блок ввода данных (показаний образцового плотномера, температуры анализируемой жидкости) и блок выбора режима работы (измерение или калибровка). Устройство ввода и отображения информации имеет 3 выхода и 3 входа, которыми соединено с устройством обработки и преобразования.

3.2 Разработка алгоритма функционирования волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Управление ВОИИС для определения плотности жидких сред в целом осуществляется с помощью микропроцессорного контроллера, который позволяет осуществлять калибровку системы и вычислительные операции в режиме реального времени. Калибровка информационно-измерительной системы необходима для обеспечения точности и достоверности его измерений. Данная операция позволяет учесть погрешность линейности функции преобразования, влияние таких факторов как износ, изменение каких-либо параметров датчика в ходе эксплуатации (особенно налипание вязких составляющих жидкостей на поплавки и сильфоны, смещение элементов оптической системы относительно друг друга), а также воздействие внешних факторов (температуры, давления, вибрации и др.). Регулярная калибровка обеспечивает точность и достоверность данных, получаемых в ходе измерения и в большинстве случаев является обязательным требованием нормативных документов и стандартов качества.

Разработанный алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред включает в себя процесс калибровки ВОИИС и процесс измерения плотности жидких сред. Процесс калибровки позволяет

определить калибровочные коэффициенты в соответствии с данными образцового прибора, которые будут учитываться в процессе измерения плотности жидких сред. Калибровка разрабатываемой ВОИИС подразумевает несколько итераций. Используются либо несколько анализируемых жидкостей с различной плотностью, которые заливаются в измерительную емкость поочередно, либо одна анализируемая жидкость, плотность которой изменяется посредством добавления различных добавок. Процесс измерения учитывает полученные в результате калибровки калибровочные коэффициенты, температуру анализируемой жидкости и коэффициенты температурной коррекции в соответствии с измеренной плотностью.

3.2.1 Разработка алгоритма калибровки волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Начало калибровки ВОИИС для определения плотности жидких сред происходит с выбора режима работы «Калибровка» на устройстве ввода и отображения информации. Блок-схема алгоритма функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред в режиме калибровки представлена на рисунке 3.2.

Если выбран режим «Калибровка», необходимо ввести значение образцовой плотности $\rho_{обр}$, полученного с помощью образцового плотномера. Данные образцовой плотности записываются в блок данных калибровки. После введения данных происходит заполнение емкости анализируемой жидкостью.

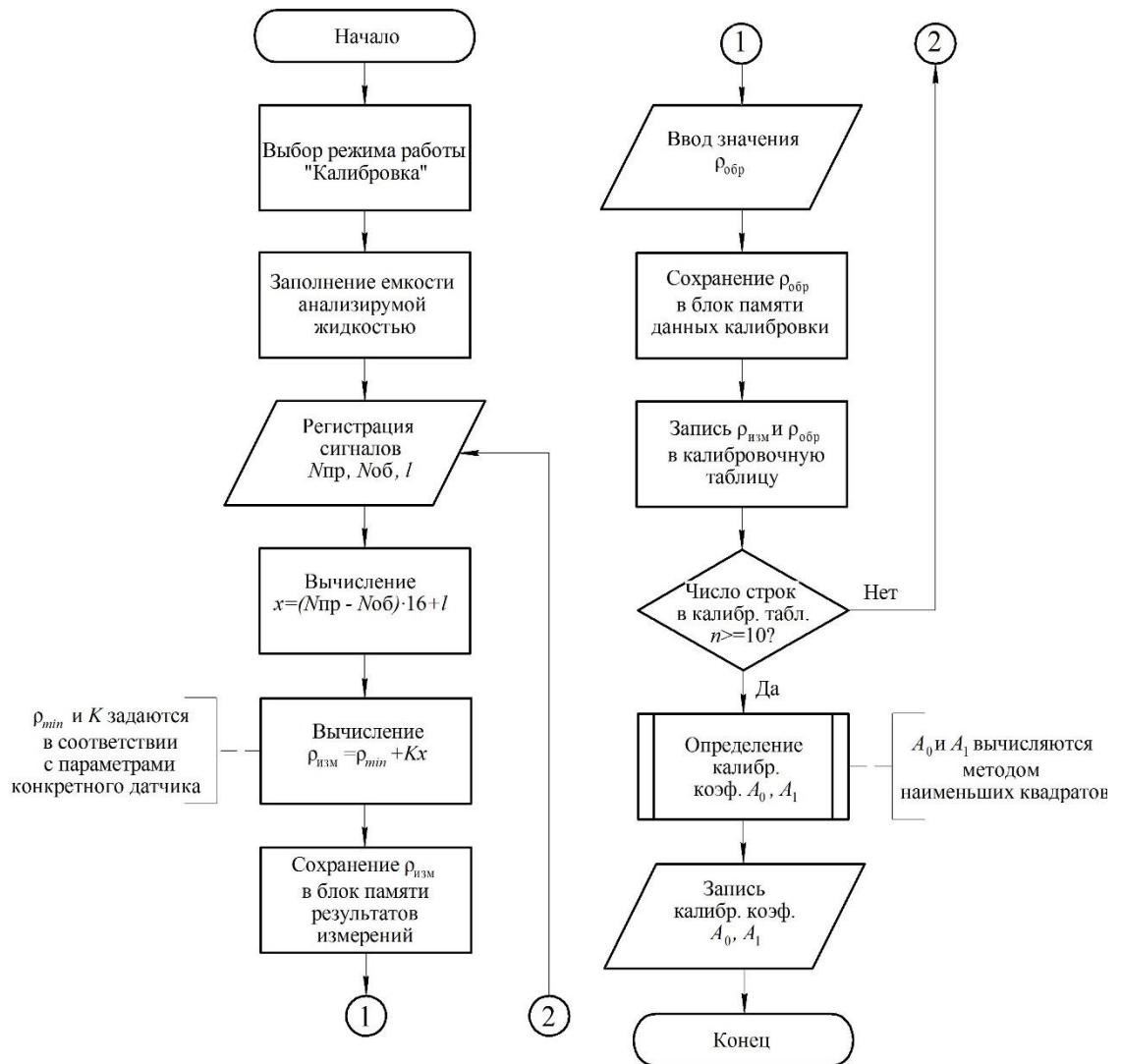


Рисунок 3.2 - Блок-схема алгоритма функционирования ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей в режиме калибровки

При перемещении поплавка и, соответственно растровой решетки, пропорционально плотности жидкости, на выходе блока обработки сигналов формируются сигналы $N_{пр}$, $N_{об}$, l , которые принимаются и регистрируются блоком обработки и преобразования информации.

Вычисление перемещения поплавка производится по формуле:

$$x = (N_{пр} - N_{об}) \cdot 16 + l.$$

После чего вычисляется предварительное значение плотности анализируемой жидкой среды:

$$\rho_{изм} = \rho_{min} + Kx,$$

которое записывается в блок памяти результатов измерения. Значение ρ_{min} определяется исходя из крайнего нижнего положения поплавка по приведенной во второй главе формуле и зависит от параметров поплавка и стержня штока-толкателя, а также от жесткости сильфонов и максимального перемещения под воздействием на него указанных сил. Коэффициент K также определяется исходя из параметров поплавка и сильфонов по формуле, приведенной в главе 2. Эти два значения являются постоянными для каждого измерительного преобразователя в соответствии с его параметрами и задаются в программном коде как постоянные величины.

Далее производится запись значений измеренной плотности и значений образцового плотномера в калибровочную таблицу. Количество строк в калибровочной таблице должно быть не менее 10. Из данных калибровочной таблицы с помощью метода наименьших квадратов определяется интерполяционный полином первой степени вида:

$$\rho_{обр} = \rho_{изм} A_1 + A_0.$$

Полученные калибровочные коэффициенты A_1 и A_2 записываются в блок памяти калибровочных коэффициентов. Калибровка завершена, когда количество проведенных итераций составляет 10 и более, определен интерполяционный полином и, соответственно, калибровочные коэффициенты. По окончании калибровки на дисплее устройства ввода и отображения информации появляется сообщение «Калибровка завершена».

3.2.2 Разработка алгоритма измерения волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Измерение плотности начинается с выбора соответствующего режима «Измерение», а также требования ввести значения температуры анализируемой жидкости Θ . После выбора режима ёмкость заполняется анализируемой жидкостью. Блок-схема алгоритма функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред в режиме измерения представлена на рисунке 3.3. Аналогично с режимом калибровки регистрируется перемещение поплавка в совокупности с растровой решеткой, на выходе блока обработки сигналов формируются сигналы $N_{пр}$, $N_{об}$, I , которые принимаются и регистрируются блоком обработки и преобразования информации.

Производится вычисление перемещения поплавка x и предварительного значения плотности анализируемой жидкой среды:

$$\rho_{изм} = \rho_{min} + Kx,$$

которое записывается в блок памяти результатов измерения.

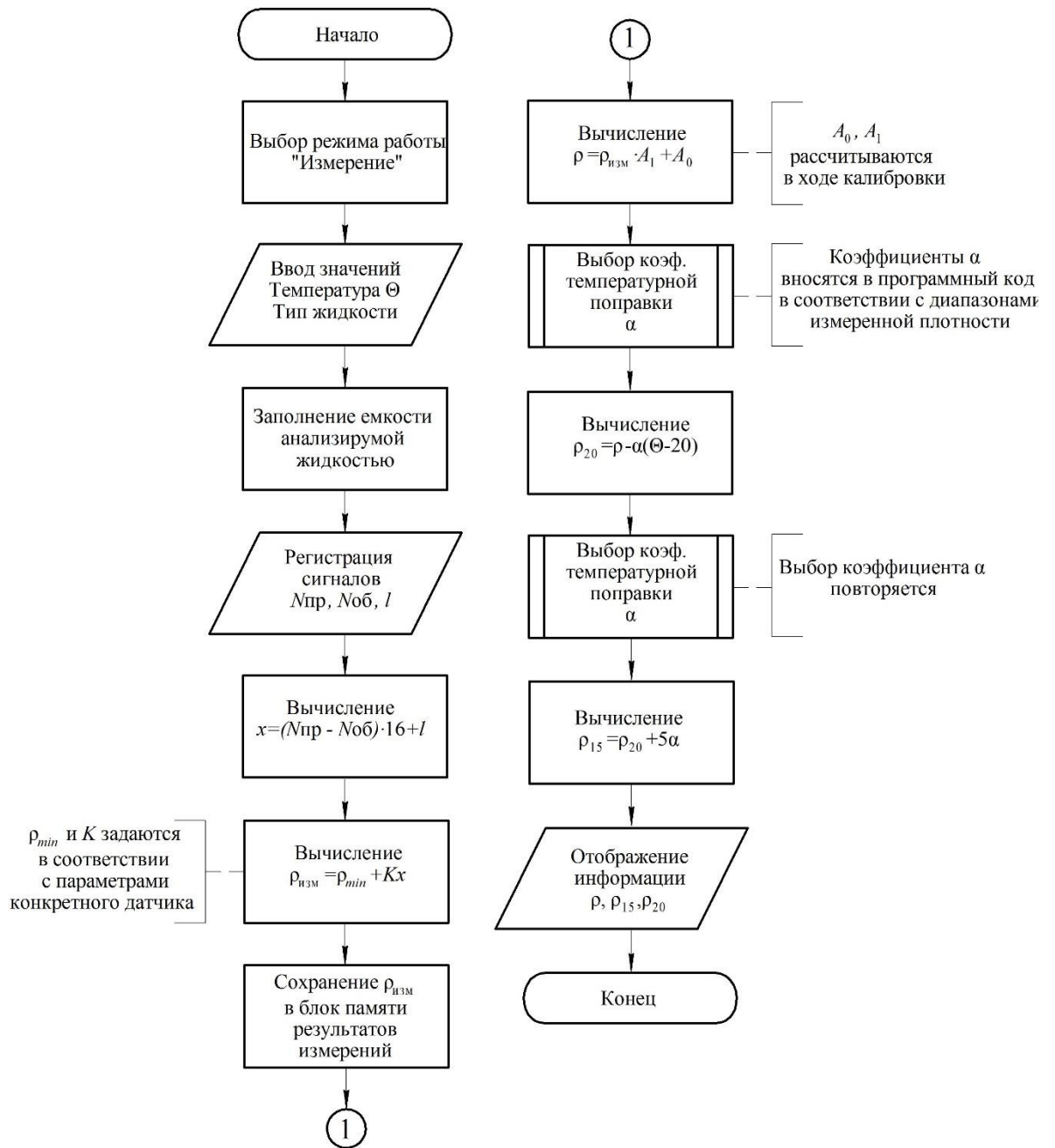


Рисунок 3.3 - Блок-схема алгоритма функционирования ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей в режиме измерения

Рассчитанные калибровочные коэффициенты A_0 и A_1 применяются для определения результирующего уравнения для расчета измеренной плотности с учетом данных калибровки в режиме «Измерение»:

$$\rho = \rho_{изм} A_1 + A_0.$$

Данный результат является результатом измерения плотности жидкости без его приведения к стандартным условиям.

Для приведения к стандартным условиям и проведения температурной поправки результатов измерения в программном коде поддиапазонам измеренной плотности присваивается коэффициент температурной поправки α согласно таблице 3.1. Данные значения средних температурных поправок плотности для жидких нефтепродуктов являются справочными данными, представленными в [36, 37, 41].

Таблица 3.1 - Средние температурные поправки плотности

Измеренная плотность, кг/м ³	Температурная поправка α на 1°C, кг/м ³	Измеренная плотность, кг/м ³	Температурная поправка α на 1°C, кг/м ³
650 - 659	0,962	830 - 839	0,725
660 - 669	0,949	840 - 849	0,712
670 - 679	0,936	850 - 859	0,699
680 - 689	0,925	860 - 869	0,686
690 - 699	0,91	870 - 879	0,673
700 - 709	0,897	880 - 889	0,66
710 - 719	0,884	890 - 899	0,647
720 - 729	0,87	900 - 909	0,633
730 - 739	0,857	910 - 919	0,62
740 - 749	0,844	920 - 929	0,607
750 - 759	0,831	930 - 939	0,594
760 - 769	0,818	940 - 949	0,581
770 - 779	0,805	950 - 959	0,567
780 - 789	0,792	960 - 969	0,554
790 - 799	0,778	970 - 979	0,541
800 - 809	0,765	980 - 989	0,528
810 - 819	0,752	990 - 999	0,515
820 - 829	0,738	1000 - 1010	0,502

С учетом введенной температуры анализируемой жидкости рассчитывается результирующее значение измеренной плотности, приведенной к 20°C:

$$\rho_{20} = \rho - \alpha(\Theta - 20^{\circ}\text{C}).$$

Для получения результата измерения плотности, приведенного к 15°C применяется формула:

$$\rho_{15} = \rho_{20} + 5\alpha.$$

В данном случае следует учесть, что необходимо повторно определить коэффициент поправки α согласно таблице, в соответствии со значением плотности, приведенного к 20°C.

Полученные значения плотности ρ , ρ_{15} , ρ_{20} выводятся на блок индикации устройства ввода и отображения информации.

Обобщенная блок-схема алгоритма функционирования ВОИИС для определения плотности жидких сред, включающая в себя как режим калибровки, так и режим измерения приведена на рисунке 3.4.

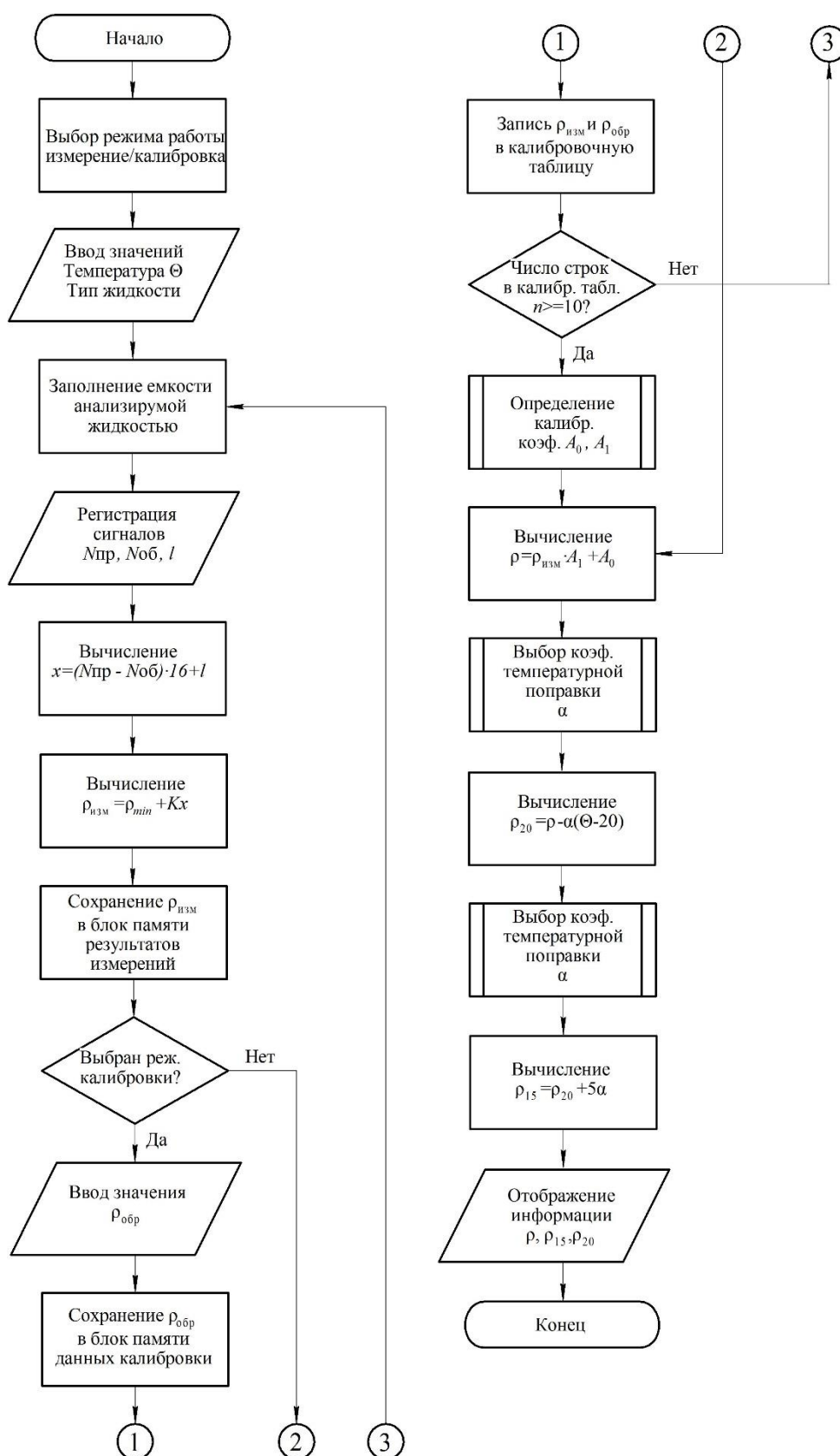


Рисунок 3.4 - Алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей

Согласно приведенным алгоритмам калибровки и измерения волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности жидких сред был разработан имеющий государственную регистрацию программный комплекс [81] для ЭВМ в среде IAR Embedded Workbench на языке С, часть кода которой представлена в приложении А.

3.3 Разработка датчика плотности в составе волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

В соответствии с поставленной задачей предлагаемое устройство для измерения плотности пожароопасных жидкостей состоит из полностью погруженного в жидкость поплавка, закрепленного с помощью верхнего и нижнего сильфонов между двумя кронштейнами, штока-толкателя и оптической решетки, двух подводящих оптических волокон (ПОВ), двух отводящих оптических волокон (ООВ). На рисунке 3.5 представлена функциональная схема измерительного устройства [2, 24].

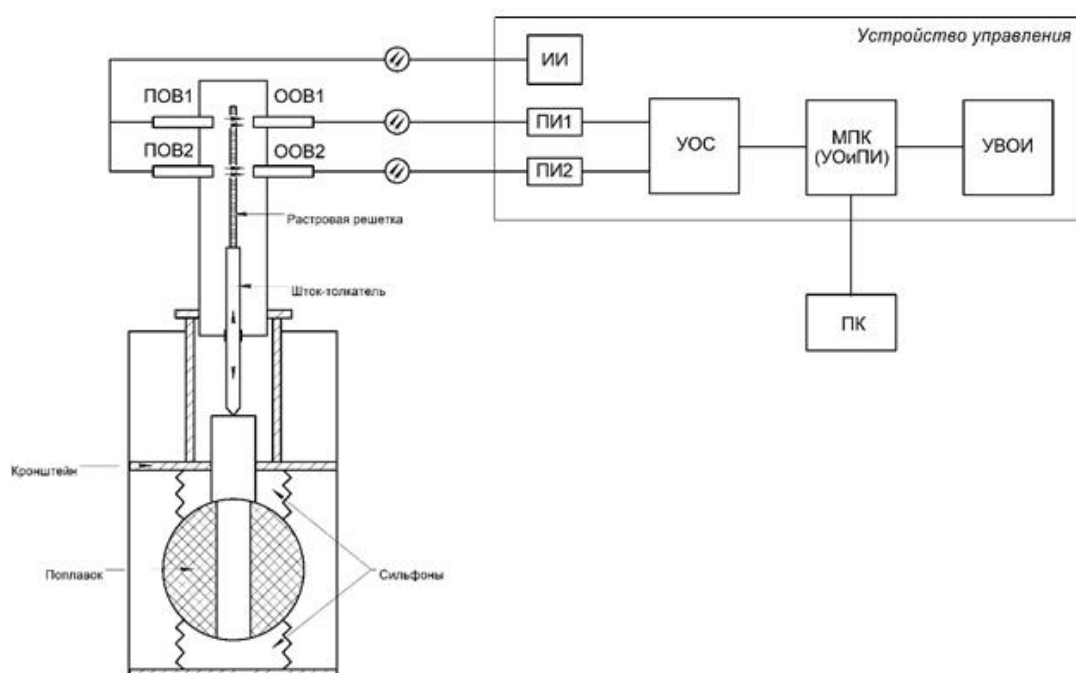


Рисунок 3.5 - Функциональная схема ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей

Согласно функциональной схеме датчик плотности жидкости в составе ВОИИС содержит кронштейны, крепящиеся к стенке емкости с анализируемой жидкостью, к кронштейнам одними концами закреплены сильфоны, другие концы которых герметично закреплены на поплавке, имеющим по центру сквозное отверстие, соединяющее полости сильфонов, шток-толкатель, растровую решетку, жестко соединенную со штоком-толкателем, а также две пары подводящих и отводящих оптических волокон (ПОВ1 – ООВ1, ПОВ2 – ООВ2) [24]. Излучение в подводящие оптические волокна вводится с помощью источника излучения (ИИ) ИК-спектра, а с отводящих оптических волокон поступает на приемники излучения (ПИ1, ПИ2) для первого и второго измерительных каналов соответственно. Два измерительных канала предусмотрены для того чтобы обеспечить корректный счет импульсов как при прямом, так и при обратном ходе растровой решетки и избежать так называемого дребезга преобразователя - ложного счета, когда количество импульсов при обратном ходе растровой решетки считывается счетчиком как при прямом ходе, то есть возникает неточность определения значения перемещения растровой решетки. Для этого сигналы первого и второго измерительного каналов смещены относительно друг друга на 90° , что упрощает дальнейшее амплитудно-логическое преобразование сигналов и позволяет выполнить корректный счет импульсов как при прямом ходе растровой решетки, так и при обратном [53]. Смещение сигналов измерительных каналов на 90° обеспечивается установкой торцов ПОВ-ООВ первого измерительного канала напротив пропускающего участка растровой решетки, а торцов ПОВ-ООВ второго измерительного канала напротив поглощающего участка растровой решетки. Электрические импульсные сигналы с ПИ1 и ПИ2 поступают устройство обработки сигналов (УОС), реализуемое на печатной плате и состоящее из блока формирования логических сигналов, а также счетчиков прямого и обратного счета. Счетчики так же могут не выделяться как отдельные компоненты, так как большинство современных микроконтроллеров имеют встроенные программируемые

таймеры/счетчики. С УОС сигналы поступают на устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ), реализованное с помощью микроконтроллера. УОиПИ соединено с устройством ввода и отображения информации (УВОИ), где отображаются измеренные параметры, а также задаются необходимые вводные данные. Источник и приемники излучения, устройство обработки сигналов, устройство обработки и преобразования информации и устройства ввода и отображения информации конструктивно объединены в единый корпус устройства управления. Также предусмотрена возможность подключения к ПК.

При перемещении поплавка и соответственно растровой решетки приемники излучения ПИ1 и ПИ2 формируются импульсные синусоидальные сигналы, сдвинутые между собой на 90° , которые поступают на блок формирования логических сигналов УОС. Блок формирования логических сигналов в свою очередь включает в себя усилители, компараторы, логический фильтр и электронный нониус. Структурная схема блока формирования логических сигналов представлена на рисунке 3.6.

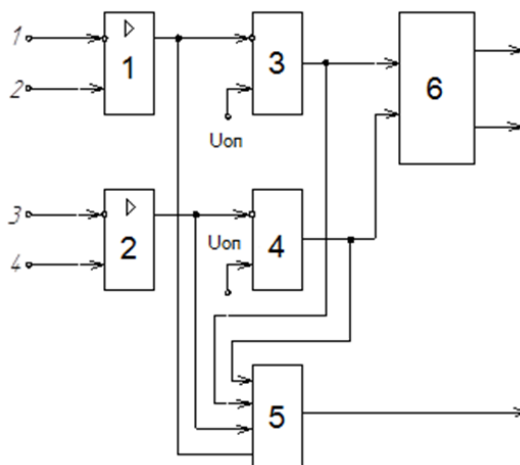


Рисунок 3.6 - Структурная схема блока формирования логических сигналов

1,2 – усилители, 3,4 – компараторы, 5 – электронный нониус, 6 – логический фильтр

Компаратор предназначен для сравнения мгновенных значений двух аналоговых сигналов напряжений (входного напряжения $U_{\text{вх}}$ с опорным напряжением $U_{\text{оп}}$). Компаратор переключается в момент равенства $U_{\text{вх}} = U_{\text{оп}}$ (в качестве пояснения приведены временные диаграммы компаратора для синусоидального периодического сигнала на рисунке 3.7). Выходное напряжение имеет прямоугольную форму [53]. При $U_{\text{оп}}=0$ компаратор осуществляет фиксацию момента перехода входного напряжения через нуль.

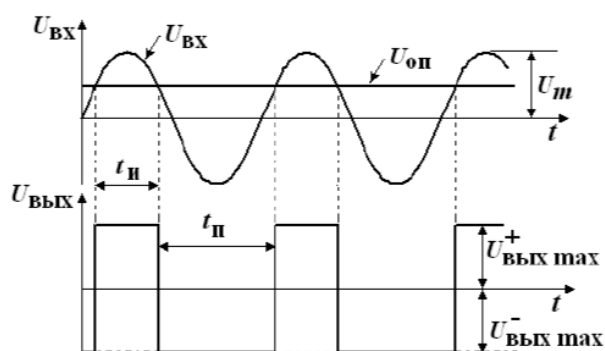


Рисунок 3.7 - Временные диаграммы компаратора для периодического входного сигнала

Таким образом, синусоидальные импульсы, поступающие на компараторы, преобразуются в прямоугольный сигнал. В логических схемах сигналу высокого уровня приписывается значение логической «1», а низкому — логического «0».

Сигналы с компараторов поступают на логический фильтр, схема которого представлена на рисунке 3.8.

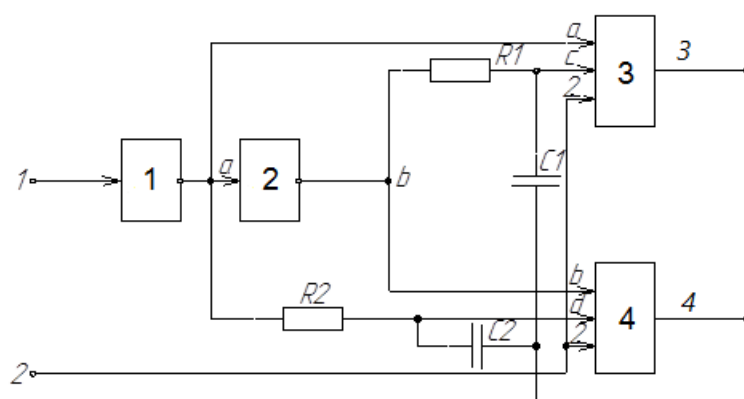


Рисунок 3.8 - Структурная схема логического фильтра

1, 2 –инверсия, 3,4 – конъюнкция

При прямом перемещении растровой решетки логический фильтр пропускает импульсы на вход счетчика прямого счета, при обратном перемещении – пропускает импульсы на вход счетчика обратного счета. Цена каждого импульса составляет 16 мкм. Работа логического фильтра поясняется осциллограммами, представленными на рисунке 3.9 а, б, которые сняты в соответствующих точках схемы 1, 2, 3, 4, а, б, с и d, для прямого и обратного счета.

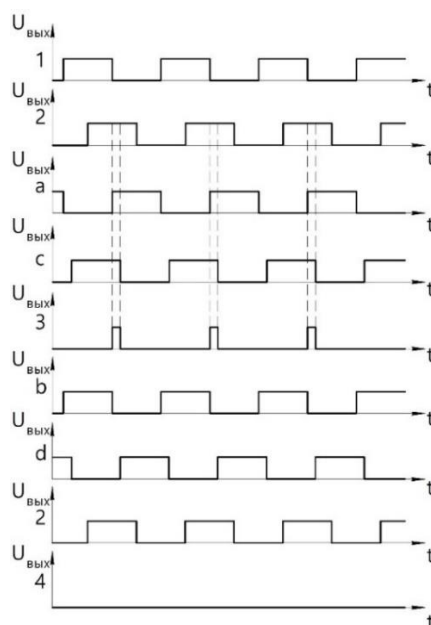


Рисунок 3.9 а - Осциллограммы сигналов, проходящих через логический фильтр при прямом ходе растровой решетки

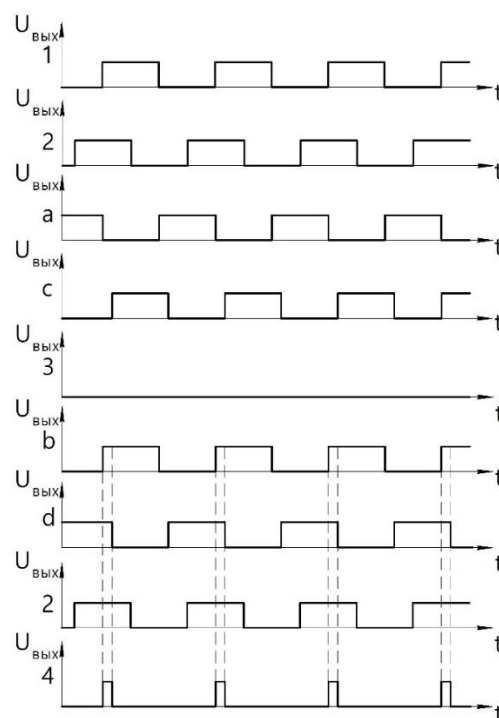


Рисунок 3.9 б - Осциллограммы сигналов, проходящих через логический фильтр при обратном ходе растровой решетки

Электронный нониус предназначен для более точного преобразования перемещения растровой решетки и функционирует следующим образом. Потенциометрические резисторы устанавливают пороговый уровень срабатывания компараторов таким образом, чтобы сигналы на их входах имели сдвиг на $1/16$ шага растровой решетки. Уровни компараторов поступают на восьмиразрядный регистр электронного нониуса, код с которого поступает на УОиПИ.

Функциональная схема электронного нониуса представлена на рисунке 3.10.

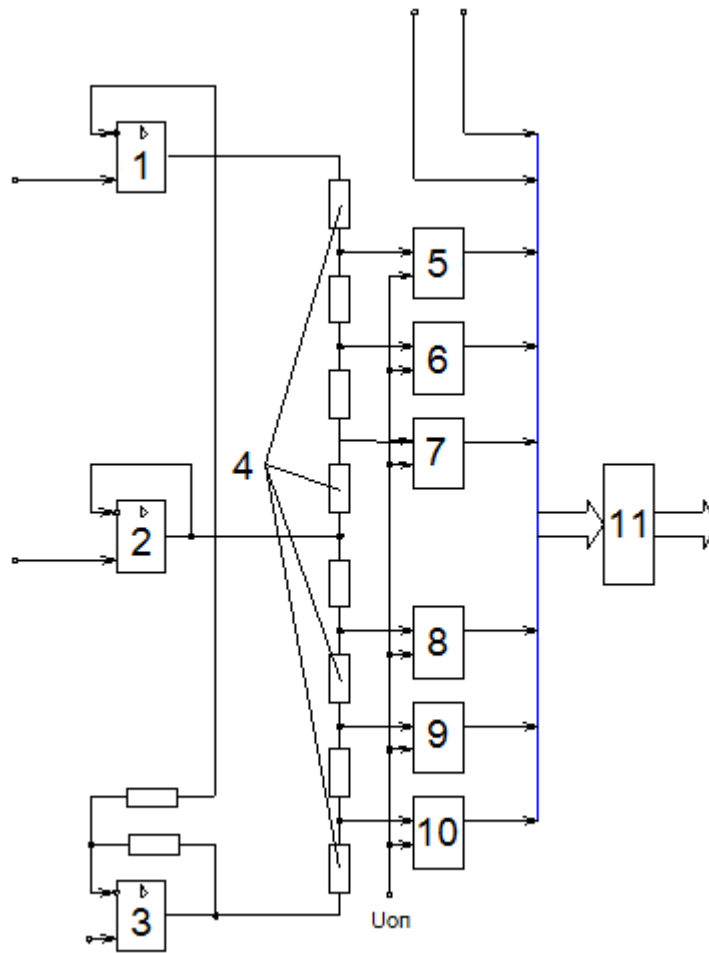


Рисунок 3.10 - Функциональная схема электронного нониуса.

1, 2, 3 – усилители, 4 – резисторы, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – компараторы, 11 – восьмиразрядный регистр

Уровни компараторов поступают на восьмиразрядный регистр, код с которого считывается блоком обработки информации, и по таблице соответствия кода метрической величине определяется истинное значение перемещения оптической решетки. На рисунке 3.11 представлены диаграммы формирования логического сигнала электронного нониуса.

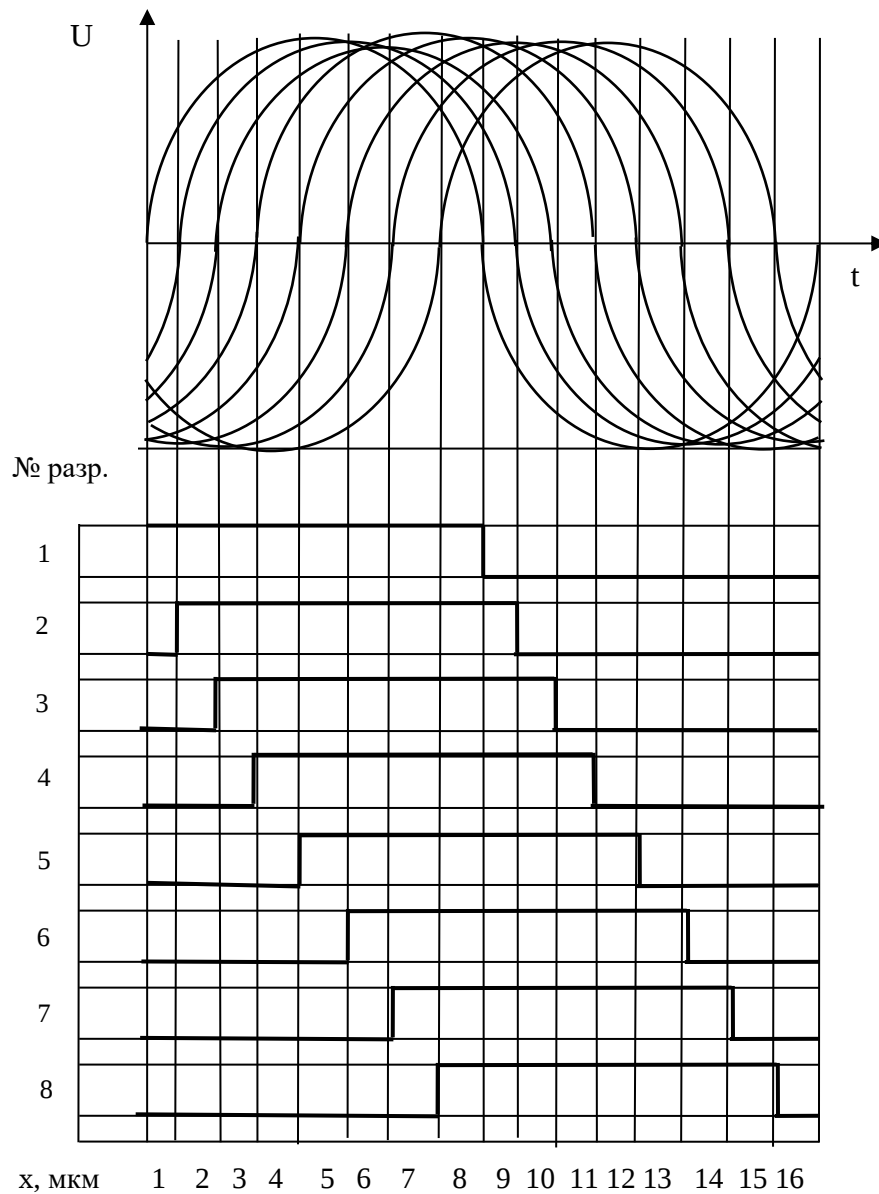


Рисунок 3.11 - Диаграммы формирования логического сигнала электронного нониуса

Так как счетчики таймеров работают в обратном направлении, то для определения фактического количества импульсов на выходе счетчика производятся следующие вычисления [2, 24]:

$$N_{\text{факт}} = N_1 - N_2,$$

где $N_{\text{факт}}$ – фактическое значение импульсов,

N_1 – первоначальное значение счетчика,

N_2 – текущее значение счетчика.

Для предотвращения так называемого дребезга, который может возникнуть при каких-либо ударах, толчках, колебаниях и вибрации емкости или колебания поплавка и растровой решетки соответственно под действием завихрений жидкости, истинное значение перемещения оптической решетки определяется как разность значения счетчика прямого счета и значения счетчика обратного счета. Преобразование показаний счетчиков в метрическую систему производятся следующие вычисления [2, 24]:

$$x = (N_{\text{пр.сч.}} - N_{\text{обр.сч.}}) \cdot 16 \text{ мкм},$$

где x – перемещения оптической решетки и поплавка в мкм, $N_{\text{пр.сч.}}$ – значение счетчика прямого счета, $N_{\text{обр.сч.}}$ – значение счетчика обратного счета.

Стоит отметить, что полученный результат достаточно неточен. Для повышения чувствительности измерительного преобразователя применяется электронный нониус, который представляет собой схему преобразования аналогового сигнала, представляющего собой период синусоиды, в кодовый сигнал, который поступает на УОиПИ.

Общий результат перемещения поплавка в совокупности с растровой решеткой будет равен [24]:

$$x = [(N_{\text{пр.сч.}} - N_{\text{обр.сч.}}) \cdot 16 + l] \text{ мкм},$$

где l – показания нониуса в мкм.

Так как перемещение оптической решетки пропорционально плотности жидкости, то для получения показателя плотности воспользуемся формулой, полученной во второй главе:

$$\rho = \rho_{\min} + Kx.$$

Как уже говорилось, такие параметры как $\rho_{\min}$ и K определяются исходя из параметров поплавка и сильфонов согласно потребностям для заданного технологического процесса.

Вычисления выполняются на УОиПИ (микроконтроллере) в соответствии с внесенной программой, а результат хранится в памяти данных. Измеренные значения отображаются на цифровом дисплее устройства ввода и

отображения информации. Имеется возможность подключения к персональному компьютеру оператора.

Разработанный экспериментальный образец представлен на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 - Поплавковый датчик плотности в составе ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей

Общие габаритные размеры экспериментального образца датчика составляют $15 \times 15 \times 55$ см, вес 0,7 кг, что показывает его относительную компактность по сравнению с выпускаемыми датчиками плотности, габаритные размеры которых могут достигать 18 метров в длину и более в зависимости от высоты ёмкости или резервуара и длины направляющей у магнитострикционных поплавковых плотномеров, а вес составлять около 11-15 кг. Датчик устанавливается на стенку емкости или резервуара, а блок управления может располагаться удаленно от технологического объекта и места протекания технологического процесса, что упрощает его установку и эксплуатацию. Подавляющее большинство применяемых поплавковых датчиков, как единичных, так и в составе информационно-измерительных систем, имеют крепление к крыше резервуара или емкости, там же устанавливается блок управления. Данное решение осложняется тем, что в настоящее время существуют резервуары, оборудованные плавающей крышей

(понтон), поэтому установка датчика и сопутствующего оборудования на крышу становится невозможным.

Поплавки и сильфоны. Для экспериментального образца датчика применяется поплавок объемом $V=210 \text{ см}^3$ и массой $m_{\text{п}}=150 \text{ г}$. Масса штока-толкателя $m_{\text{ст}}=50 \text{ г}$. Расчетная жесткость сильфона $k=20 \text{ Н/м}$. Максимальное перемещение каждого сильфона составляет 15 мм на расширение и сжатие. Параметры измерительного преобразователя могут изменяться в зависимости от требуемого диапазона измерения, анализируемой среды, материала, требований технологического процесса и т.д. Поплавки, сильфоны, штока-толкатель и кронштейны изготавливаются из нержавеющей высоколегированной стали 03X17H14M3 или ее аналога 10X17H13M2T. Сталь данных марок устойчива к коррозии, агрессивным и кислотным средам, температурному воздействию (от отрицательных температур до 600°C), обладает высокой пластичностью и прочностью, а также отличной свариваемостью. Герметичность соединения поплавка, сильфонов и штока-толкателя обеспечивается благодаря использованию лазерной сварки. К кронштейнам сильфоны сверху и снизу также присоединяются с помощью сварки либо герметично с помощью клея. В качестве материала для изготовления поплавка также возможно использовать фторопласт, обладающий невосприимчивостью к кислотным, щелочным и агрессивным веществам, высокой прочностью, легкостью, рабочей температурой от отрицательных значений до 270°C , а также таким важным достоинством как высокие антиадгезионные свойства, благодаря которым исключается налипание вязких частиц продукта на поплавок. Однако применение поплавка из фторопласта усложняется тем, что обеспечить герметичность соединения сильфонов с поплавком невозможно, так как из-за высоких антиадгезионных свойств данный материал не поддается склеиванию. Склейка фторопласта возможна после так называемой химической активации поверхности, однако данная процедура является очень дорогостоящей и не всегда доступной, а также не гарантирует герметичности склейки. Поэтому в случае если важна

высокая антиадгезия поплавка, например, при измерении плотности вязких и налипающих жидких сред, оптимальным решением является использование стальных поплавков с покрытием из фторопласта в виде фторопластовых лаков или суспензионных покрытий. Также возможно применение поплавков из сферопластика и вспененного эбонита в зависимости от диапазона рабочих температур анализируемых сред.

Параметры сильфонов рассчитываются исходя из их требуемой расчетной жесткости согласно параметрам поплавка и требуемым значениям его перемещения. Для рассматриваемого образца расчетная жесткость одного сильфона составила $k=20$ Н/м.

Из формулы для коэффициента жёсткости цилиндрического сильфона при осевой нагрузке могут быть рассчитаны оптимальные диаметр сильфона $D_{\text{ср}}$, шаг гофрировки и количество гофр [85, 86, 91]:

$$k = \frac{\pi E \delta^3}{3(1 - \mu^2) n D_{\text{ср}}^2 \sqrt{1 + \left(\frac{t}{D_{\text{ср}}}\right)^2}},$$

где E – модуль Юнга (нормальной упругости) материала сильфона;

δ – толщина стенки сильфона;

t – шаг гофрировки;

μ – коэффициент Пуассона;

$D_{\text{ср}}$ – средний диаметр сильфона;

n – количество гофр.

Стоит учесть, что приведенная формула является обобщенной и зависит от формы гофров, приложенных нагрузок (изгиб, кручение), свойств материала и других факторов.

Применяемые сильфоны в данном образце сильфоны имеют количество гофр $n=25$ на один сильфон, длина сильфона 30 мм, рабочий ход на растяжение и сжатие 15 мм, $D_{\text{ср}}=35$ мм, шаг гофрировки составляет $t=1-1,6$ мм, стандартная толщина стенки сильфона $\delta=0,3$ мм, модуль Юнга для данного вида стали $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0,3$. Однако при таких

параметрах t и n высок риск деформации и потери герметичности силикона из-за повышенного риска усталостного разрушения в точках концентрации напряжения, а его сжатие может привести к короблению.

Альтернативным решением является уменьшение количества гофров n до 10-15 с шагом гофрировки $t=3-4$ мм, что минимизирует риск дефектов и позволяет использовать стандартное оборудование при изготовлении, обеспечивает равномерное распределение нагрузки между гофрами, снимая локальные напряжения. Оптимальный средний диаметр составит $D_{\text{ср}}=35-40$ мм.

Источник излучения. В качестве источника излучения применяются инфракрасные светодиоды, получившие широкое применение в датчиках и информационно-измерительных системах благодаря: совпадению «окон прозрачности» кварцевых оптических волокон (850 нм, 1300 нм, 1550 нм) с диапазоном длин волн излучения ИК-светодиодов 850-1550 нм [14], что позволяет избежать межмодовой дисперсии и существенных потерь; энергоэффективности и долговечности, устойчивости к электромагнитным помехам. Несмотря на то, что лазерные диоды обеспечивают более высокую мощность и когерентность излучения, они дороже и их применение требует сложной системы охлаждения и термостабилизации, поэтому ИК-светодиоды более предпочтительны и безопасны.

В разрабатываемой ВОИИС применяется арсенидогаллиевые светодиоды 3Л107Б с диапазоном длин волн 850 – 950 нм. Данные светодиоды имеют высокую мощность излучения (до 100-150 мВт) и низкий уровень шумов, обладают рекордными в своем классе параметрами и пользуются большим спросом для применения в волоконно-оптических системах [14]. Диапазон рабочих температур (минус 40°C ...70°C) и защищенный корпус позволяет применять их в промышленных и полевых условиях.

Приемник излучения. Приемник излучения для применения в волоконно-оптических измерительных системах должен отвечать следующим требованиям: иметь чувствительность в рабочем диапазоне волн не менее 45

дБ, низкий уровень шумов и большое быстродействие [1, 54]. Также требуется максимальное согласование спектральных характеристик источника и приемника излучения.

Для работы со светодиодами типа 3Л107Б в оптоволоконных системах важно выбрать фотодиоды, обеспечивающие высокую чувствительность, быстрый отклик и спектральную совместимость. Наиболее подходящими приемниками излучения являются полупроводниковые фотодиоды, а именно PIN-диоды [54]. PIN-диоды широко применяются в оптоволоконных системах благодаря таким преимуществам, как высокая скорость отклика, широкая полоса пропускания, линейность характеристик, низкий уровень шумов, простота, надежность и долговечность, низкая стоимость. Кремниевые фотодиоды обладают большей чувствительностью в ближнем ИК-диапазоне, в то время как InGaAs-фотодиоды более чувствительны на длинах волн более 1100 нм. В ближнем ИК-диапазоне наиболее предпочтительны кремниевые фотодиоды по причине их лучшей спектральной совместимости со светодиодами ближнего ИК-диапазона, а также стабильной работы в условиях перепада температур без дополнительной термостабилизации и охлаждения, как того требуют InGaAs-фотодиоды. Наиболее совместимыми со светодиодом 3Л107Б считаются фотодиоды КФДМ и ФД256 по причине подходящего спектрального диапазона (КФДМ 800-1100 нм, ФД256 400-1100 нм) и высокой чувствительности в ближнем ИК-диапазоне.

Волоконно-оптический растровый преобразователь. К штоку-толкателю с помощью клея крепится растровая решетка из диоксида кремния, на которую нанесены с помощью поглощающей ИК-излучение краски периодические штрихи шириной 8 мкм. Толщина растровой решетки определяется свойствами кремния и технологическими возможностями ее изготовления. Стандартно ее толщина может составлять 100-200 мкм, однако за счет применения химического или механического травления толщину можно снизить до 10-50 мкм. При толщине менее 50 мкм пластины становятся хрупкими и сложными для литографии и нанесения рисунка без деформаций,

поэтому если размеры преобразователя позволяют, для изготовления растровых решеток предпочтительно применять кремниевые пластины толщиной 50 мкм и более.

Шток-толкатель и волоконно-оптический преобразователь конструктивно помещены в герметичный цилиндрический корпус. Подводящие и отводящие оптоволоконные кабели состоят и включают в себя два многомодовых волокна с диаметром сердцевины 200 мкм, варианты исполнения указаны на рисунке 3.13.

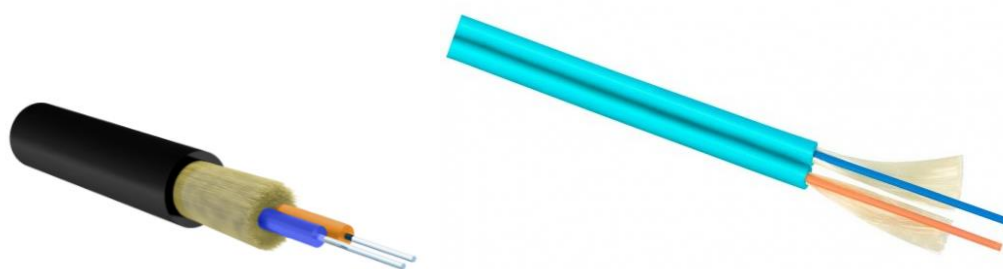


Рисунок 3.13 - Варианты исполнения оптоволоконных кабелей с двумя волокнами

Оптоволокно с диаметром сердцевины 200 мкм наиболее подходит для применения в промышленности как элемента датчиков, измерительных систем и систем автоматизации и обладает рядом преимуществ, среди которых выделяются: простота монтажа; устойчивость к механическим воздействиям, меньшая восприимчивость к изгибам и микротрещинам; большой диаметр сердцевины, который способствует более простой юстировке оптического волокна и источника излучения снижая требования к точности их взаимного расположения и соединения.

Основными производителями оптоволокна с диаметром сердцевины 200 мкм, специализирующимися на решениях для промышленности, в том числе нефтегазовой, являются: Corning Incorporated, Thorlabs, LEONI Fiber Optics, Molex, Nufern, Fujikura, Fibercore Ltd, Coherent, CeramOptec, IXFiber и др.

Для промышленных датчиков и измерительных систем, применяемых в нефтегазовой отрасли, ключевыми критериями являются:

- термостойкость (оптоволоконные кабели с полиимидным покрытием могут применяться при температуре процесса до 400°C);
- химическая стойкость (к агрессивным средам, кислотам, растворителям, маслам);
- механическая прочность (гибкость, устойчивость к деформации и вибрации).

Среди рассмотренных производителей были выделены кварцевые оптические волокна с полиимидным покрытием, соответствующие заявленным критериям: Molex FBP/FIP, LEONI Fiber Optics Fiberguide IndustriLine, CeramOptec HCS, Fibercore Ltd HFBR, Thorlabs FT200UMT.

Для стандартных кварцевых многомодовых оптических волокон с диаметром сердцевины 200 мкм в ИК-диапазоне на используемой длине волны 850-965 нм затухание составляет 2-6 дБ/км. Минимальные потери наблюдаются в окне прозрачности на длине волны 850 нм, а на длинах волн 900-965 нм потери растут из-за рэлеевского рассеяния, межмодовой дисперсии и наличия OH^- -ионов. Для расстояний 100-300 м данные значения затуханий не критичны, однако рекомендуется рассмотреть оптические волокна с низким затуханием и низким содержанием OH^- -ионов (маркировка «Low-OH»), такие как:

- Molex FBP/FIP (Ultra Low-OH) - затухание <2 дБ/км для длин волн 850-950 нм;

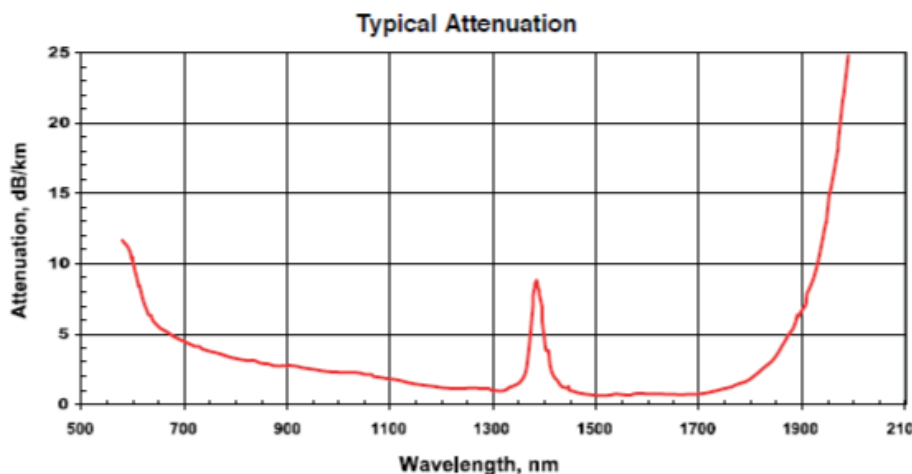


Рисунок 3.14. Затухание оптического волокна Molex FBP/FIP

– Thorlabs FT200UMT (Low-OH) - затухание 1–2 дБ/км на 850–965 нм.

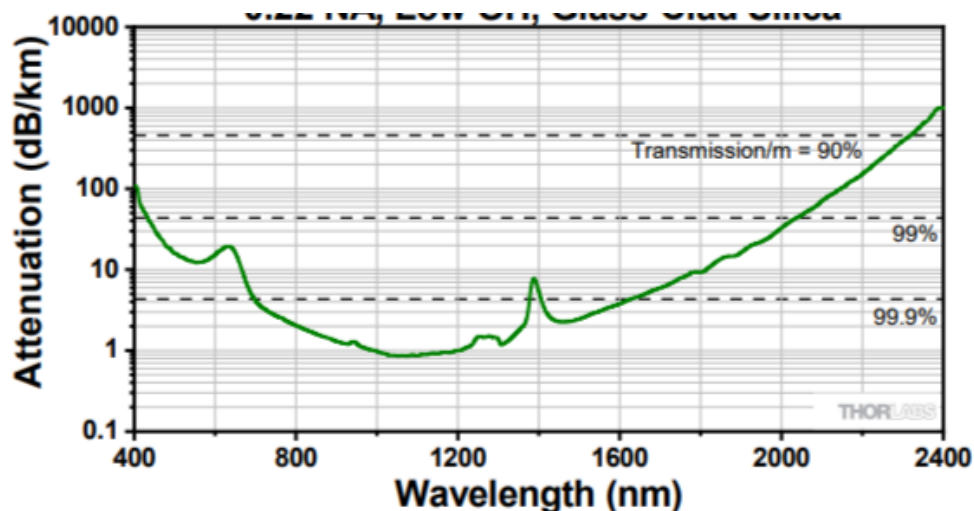


Рисунок 3.15. Затухание оптического волокна Thorlabs FT200UMT (Low-OH)

Подводящий оптоволоконный кабель вводится в цилиндрический корпус через металлическую втулку, которая фиксируется с помощью винтов и герметизируется клеем, либо герметичность соединения обеспечивается при помощи сварки. Внутри втулки кабель фиксируется с помощью заливки клеем-компаундом. Аналогичным образом фиксируется отводящий оптический кабель. Втулки устанавливаются на соответствующем расчётном расстоянии относительно друг друга и относительно растровой решетки. Данные расстояния контролируются с помощью измерительного микроскопа. Выпирание или углубление оптоволоконного кабеля за границы втулки внутри цилиндрического корпуса не допускается, торцы оптоволоконного кабеля должны находиться в одной плоскости с торцом втулки. Торцевые поверхности оптических волокон должны быть отполированы для минимизации дополнительных оптических потерь.

Оптические коннекторы. Для ввода излучения от светодиода в кварцевое оптическое волокно с диаметром сердцевины 200 мкм предпочтителен коннектор SMA по нескольким причинам. SMA-коннекторы рассчитаны на работу с волокнами большого диаметра (обычно 100–1500 мкм) и обеспечивают плотное и крепление за счет резьбового соединения,

минимизирующего зазоры между светодиодом и волокном и обеспечивающее более жесткую фиксацию (по сравнению с коннекторами с защелками, такими как ST и LC), что важно в условиях вибраций, а металлический корпус коннектора устойчив к механическим воздействиям и перепадам температур. Снизить потери на ввод излучения также позволяют SMA-коннекторы с коллимирующей линзой.

Для вывода излучения от оптического волокна к фотодиоду так же применяется оптический коннектор SMA. Учитывая, что активная область фотодиода больше 200 мкм, используется SMA-коннектор без интегрированной линзы.

Счетчики. Для счета импульсов при прямом и обратном ходе растровой решетки в качестве счетчиков используется микросхема i8254 Intel. Это программируемый интервальный таймер, который содержит в себе три независимых 16-битных счетчика, каждый из которых можно настраивать на разные режимы работы. Поддерживает входные частоты до 10 МГц в зависимости от модификации, что позволяет работать с разнообразными временными интервалами и сигналами. Отличается надежностью, энергоэффективностью, возможностью каскадирования и универсальностью. Стоит отметить, что в настоящее время счетчики в виде отдельного компонента используются редко, так как их функции интегрированы в современные микроконтроллеры.

Микроконтроллер. Устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ) реализуется с помощью микроконтроллера. В разрабатываемой системе на микроконтроллер возложены следующие функции: обработка сигналов счетчиков прямого и обратного хода, обработка сигналов электронного нониуса, вычисление перемещения поплавка и растровой решетки, вычисление значения плотности, вычисление калибровочных коэффициентов, вычисление температурной поправки для температур 15°C и 20°C, ввод информации с блока ввода информации, вывод информации на дисплей, вывод информации на ПК.

В разрабатываемой ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей применяется микроконтроллер ATmega 8515 фирмы Atmel.

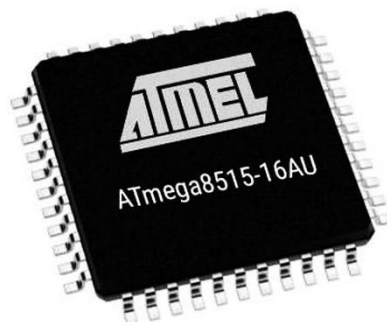


Рисунок 3.16. Внешний вид микроконтроллера ATmega 8515

Данный микроконтроллер имеет 8-битную RISC-архитектуру AVR с тактовой частотой до 16 МГц и способен выполнять до 16 миллионов инструкций в секунду, что обеспечивает быструю обработку данных. Для записи и хранения программного кода предусмотрено 8 КБ Flash-памяти, для долговременного хранения настроек предусмотрены 512 байт SRAM для данных и 512 байт энергонезависимой памяти EEPROM. Предусмотрены USART, SPI и аналоговый компаратор для связи с внешними устройствами, два таймера/счетчика (8-битный и 16-битный) с поддержкой широтно-импульсной модуляции (6 каналов), сторожевой таймер и встроенный RC-генератор для повышения надежности. Энергоэффективность обеспечивается режимами пониженного потребления (Idle, Power-down) для работы от батарей и возможностью управления тактовой частотой для оптимизации энергозатрат. Проверенная временем архитектура AVR с высокой устойчивостью к помехам и доступность данных микроконтроллеров делает их подходящими для простых и средних информационно-измерительных систем, и систем управления, а также для прототипирования. Для подключения микроконтроллера возможно применение прямого подключения к GPIO без протоколов, а также с помощью интерфейса SPI и UART/USART через протокол RS-485.

Таким образом, разработанный датчик плотности в составе ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей обеспечивает:

- непрерывное измерение плотности жидких пожароопасных сред в режиме реального времени без отрыва от технологического процесса и отбора дополнительных проб анализируемых жидкостей для лабораторных исследований;
- простоту преобразования измерительной информации за счет применения растровой решетки как элемента измерительного преобразователя, которая обеспечивает легкость кодирования измерительной информации благодаря амплитудно-логическому методу обработки выходного сигнала;
- простоту конструкции, установки и эксплуатации; малые габариты и вес по сравнению с выпускаемыми плотномерами поплавкового типа и систем с их применением;
- доступные материалы и технологии изготовления элементов датчика;
- высокий диапазон рабочих температур датчика (от минус 50°C до 350°C), соответствующий условиям большинства технологических процессов хранения и переработки нефти благодаря применению стали марок 03X17H14M3 и 10X17H13M2T, устойчивой к коррозии, агрессивным и кислотным средам, для изготовления погружных частей датчика, таких как поплавки, сильфоны, кронштейны, корпус, а также применению полиамидного покрытия для оптоволоконных кабелей;
- возможность безопасного применения во взрыво- искро- пожароопасных средах благодаря применению оптоволоконных кабелей в составе датчика и ВОИИС на его основе, позволяющих исключить наличие электрических элементов и цепей в анализируемой среде и непосредственной близости к ней.

Основные выводы и результаты

1. Разработана структурная схема ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей на основе поплавкового датчика плотности, подразумевающая возможность проведения калибровки и применения полученных данных в процессе измерения, а также температурную поправку измеренной плотности для приведения результатов к стандартным условиям.

2. Разработан алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, обеспечивающий работу в режиме калибровки, который учитывает конструктивные параметры измерительного преобразователя и позволяет определить калибровочные коэффициенты для дальнейшего их применения при измерении плотности.

3. Разработан алгоритм функционирования ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, обеспечивающий работу в режиме измерения, который учитывает конструктивные параметры измерительного преобразователя, полученные по результатам проведенной калибровки калибровочные коэффициенты и температурную поправку плотности для приведения результатов измерения к стандартным условиям.

4. Разработано техническое решение ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей и поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем в ее составе, рассмотрены конструктивные и технические особенности.

4 АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Разработанные математические модели преобразования перемещения поплавка в плотность анализируемой жидкости, полученные функциональные зависимости, а также рассмотренные особенности преобразования светового потока в открытом оптическом канале измерительного преобразователя и рассчитанные параметры оптимального расположения элементов в оптическом канале позволяют предварительно судить о результате, предопределённом конструктивными свойствами ВОИИС.

Тем не менее, моделирование предполагает идеальные условия и полное соответствие реального объекта модели, что на практике недостижимо, так как учесть все воздействующие на объект факторы невозможно. Поэтому оценивать адекватность и работоспособность разработанной ВОИИС лишь с использованием полученных данных моделирования и расчетов недопустимо.

Оценить работоспособность и адекватность разработанной ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей позволяют метод энергетического расчета оптических каналов системы, метрологический анализ ВОИИС, а также экспериментальные исследования реального образца (прототипа) разработанной ВОИИС.

4.1 Энергетический расчет оптического канала волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Для оценки работоспособности и целесообразности применения разработанной волоконно-оптической измерительной системы был проведен энергетический расчет оптического канала измерительной системы. Энергетический расчет основан на оценке потерь в оптическом канале, вносимых элементами волоконно-оптической системы.

Наибольшее влияние на потери в волоконно-оптической измерительной системе имеют [6]: узлы ввода и вывода оптического излучения (от источника излучения в оптическое волокно и из оптического волокна в приемник излучения); затухание излучения в оптическом волокне; потери на оптических разъемах; информативные и неинформативные потери оптической мощности в измерительном преобразователе; оптические потери в линзах.

На рисунке 4.1 представлена структурная схема одного из оптических каналов волоконно-оптической системы измерительной системы, где ИИ – источник излучения (светодиод ИК-спектра), ПИ – приемник излучения (фотодиод), ОК1, ОК2 – коннекторы, ОВ1, ОВ2 – оптическое волокно, ОТ1, ОТ2 – открытые торцы оптического волокна. Потери в первом и втором измерительных каналах будут одинаковыми, так как используются одинаковые элементы, поэтому далее будут рассмотрены и рассчитаны оптические потери только для одного измерительного канала [28].

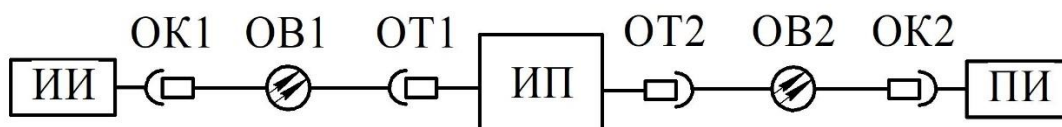


Рисунок 4.1 - Структурная схема оптического канала измерительной системы

При проведении расчета оптических потерь в системе учитывались потери, вносимые каждым указанным на схеме элементом. Значения оптических потерь, вносимых некоторыми элементами, и их составляющими взяты из литературных источников согласно проводимым исследованиям и оценкам специалистов соответствующих областей науки [48, 89].

В разрабатываемой волоконно-оптической системе измерения используется многомодовое оптическое волокно. Для разрабатываемой волоконно-оптической системы, как и для большинства устройств волоконной оптики [65] используется излучение ИК-спектра 800-1600 нм. В данном случае используется излучение ближнего ИК-спектра. Источником излучения могут быть излучающие диоды (светодиоды) с торцевым излучением.

Наиболее подходящими приемниками излучения являются полупроводниковые фотодиоды, а именно PIN-диоды, обладающие высоким быстродействием, хорошей линейностью характеристик и возможностью детектирования сигнала высоких частот [54]. Оптимальным для разрабатываемой волоконно-оптической измерительной системы согласно [6] можно считать сочетание следующих свето- и фотодиодов: 3Л107Б – ФД256, 3Л107Б – КФДМ.

Для проведения энергетического расчета волоконно-оптической измерительной системы была построена расчетная схема, представленная на рисунке. Каждым элементом схемы вносятся потери η и пронумерованы в соответствии с их расположением на схеме (Рисунок 4.2).

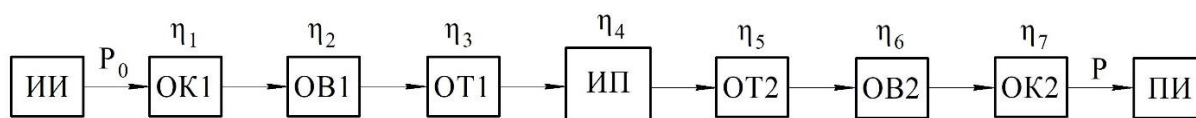


Рисунок 4.2 - Схема расчета потерь в оптическом канале волоконно-оптической измерительной системы

1. *Потери на ввод излучения в оптическое волокно.* Излучение от ИИ через оптический коннектор ОК1 поступает в оптическое волокно ОВ1.

Потери на коннекторе ОК1 возникают из-за неидеального согласования апертуры и расходимости пучка светодиода (диаграммы направленности источника излучения). Потери из-за несовпадения числовой апертуры NA светодиода и оптоволокна согласно источнику могут составлять $\eta_1 \approx 10-20$ дБ согласно источнику [50].

2. *Потери на вывод излучения.* Так как площадь чувствительной площадки (ПИ) фотодиода больше, чем диаметр торца оптического волокна, потери на вывод излучения будут не такими значительными, как на его ввод, и составят $\eta_7 = 0,8-1$ дБ.

3. *Потери в оптоволокне.* Учитывая, что светодиоды ИК-спектра имеют длину волны излучения 850-965 нм, для применяемого кварцевого многомодового оптического волокна с диаметром сердцевины 200 мкм затухание составляет 1-2 дБ/км в зависимости от вида и производителя оптического волокна [69]. Длина используемых для данной измерительной системы оптических волокон не превышает 100 м, поэтому оптические потери $\eta_2 = \eta_6 = 0,1 - 0,2$ дБ с учетом максимального затухания для применяемых длин волн.

4. *Потери на открытых торцах оптического волокна.* Потери, возникающие на торцах оптического волокна, возникают преимущественно из-за френелевского отражения на границе двух сред с разными показателями преломления. Учитывая, что в основном используются оптические волокна из кварцевого стекла, коэффициент отражения составит:

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \left(\frac{1,46 - 1}{1,46 + 1} \right)^2 = 0,0342.$$

Тогда потери на френелевское отражение составят:

$$A_{\Phi} = 10 \lg(1 - R) = 0,16 \text{ дБ.}$$

Потери из-за плохой полировки торца и возможных загрязнений могут составлять до 1 дБ. Таким образом, потери на открытых торцах оптического волокна составляют $\eta_3 = \eta_5 \approx 1,16$ дБ.

5. *Потери в измерительном преобразователе.* Измерительный преобразователь ИП включает в себя диафрагму с круглым отверстием диаметром 8 мкм и растровую решетку из диоксида кремния с чередующимися пропускающими и поглощающими областями шириной 8 мкм (излучение ИК-спектра проходит только через пропускающие области растра). Для оценки оптических потерь η_4 , возникающих в измерительном преобразователе следует учесть потери при прохождении излучением круглого отверстия диафрагмы, а также пропускающей области пластины растра. Затухание сигнала при прохождении предельного диафрагмы с круглым отверстием определяется как [54]:

$$A_d = 10 \lg \frac{d_{ОВ}}{d_o},$$

где $d_{ОВ}$ – диаметр сердцевины ОВ; d_o – диаметр отверстия в диафрагме.

Для ОВ с диаметром сердцевины 200 мкм и диафрагмы с круглым отверстием диаметром 8 мкм световой поток уменьшится в 25 раз, то есть затухание A_d составит 14 дБ. Учитывая дифракционные явления, рассмотренные в пункте 2.3.2, при условии, что торец отводящего оптического волокна расположен не далее чем на расстояние 80 мкм от диафрагмы, наблюдается снижение интенсивности излучения примерно в 2,3 раза, а затухание составит примерно $A_3 \approx 3,6$ дБ [28].

Вносимое растром затухание с учетом малой толщины пластины растровой решетки и коэффициента пропускания диоксида кремния для используемого диапазона длин волн составит не более $A_{раст} = 1,6$ дБ [28]. Воздушный зазор между подводящим и отводящим торцами ОВ вносит затухание $A_{возд}$ не более 0,1 дБ. Таким образом общие потери в измерительном преобразователе составят $\eta_4 = A_d + A_3 + A_{возд} + A_{раст} = 19,3$ дБ.

Суммарные потери в оптическом канале составят:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7.$$

С учетом значений оптических потерь на каждый элемент:

$$\eta_{\Sigma} = (10 - 20) + (0,8 - 1) + (0,1 - 0,2) + 2 \cdot 1,16 + 19,3 = 32,52 - 42,82 \text{ дБ} \approx 33-43 \text{ дБ}.$$

Учитывая, что максимальная мощность излучения светодиода $P_0=10$ мВт, минимальная принимаемая фотодиодом мощность составит $P=0,52$ мкВт.

Согласно источнику [6] чувствительность большинства приемников излучения находится в пределах -38...-56 дБ. Чувствительность кремниевых фотодиодов в ИК-диапазоне начинается с 10-100 нВт, а InGaAs-фотодиоды имеют чувствительность 1-10 мкВт, однако могут работать с меньшими мощностями при наличии усилителей. Это доказывает, что оптические потери в измерительных каналах разрабатываемой ВОИИС не превышают допустимых пределов чувствительности используемых фотоприемников.

Согласно [32] безопасная мощность оптического излучения для оборудования, применяемого во взрывоопасных средах, составляет не более 35 мВт для горючих веществ групп IIA, IIB, IIC. Максимальная мощность излучения светодиода $10 \text{ мВт} < 35 \text{ мВт}$, на фотоприемник поступает мощность не более $5,6 \text{ мкВт} \ll 35 \text{ мВт}$, мощность в зоне измерения составляет не более $8,8 \text{ мкВт} \ll 35 \text{ мВт}$, что обеспечивает искро-взрыво-пожаробезопасность разрабатываемой ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей.

4.2 Метрологический анализ волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Измерение плотности с помощью лабораторных или переносных приборов, таких как ареометры и пикнометры является наиболее распространённым способом на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса. Как правило, их абсолютная погрешность составляет $0,5-1 \text{ кг/м}^3$. Согласно рекомендациям [35, 76] пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении плотности нефти, нефтепродуктов, и смесей

нефти и жидких не нефтяных продуктов лабораторными методами (ареометрическим и пикнометрическим) не должна превышать $1,2 \text{ кг/м}^3$. Соответственно, непрерывное динамическое измерение плотности должно обеспечивать точность, коррелирующую с указанной величиной погрешности. Однако, чем конструктивно сложнее прибор, тем больше факторов воздействует на погрешность измерения и метрологические характеристики.

При проектировании волоконно-оптических систем измерения плотности должен быть проведен метрологический анализ и приняты решения по снижению возможных погрешностей [66]. Метрологический анализ измерительного канала волоконно-оптической системы измерения плотности жидкостей необходим для обнаружения возможных источников погрешностей и определения способов их минимизации.

В разрабатываемом датчике измеряемая плотность жидкости посредством результирующей силы $F(\rho)$, воздействующей на поплавков, преобразуется в перемещение растровой решетки x . Схемно-аналитическая модель преобразования представлена на рисунке 4.3.

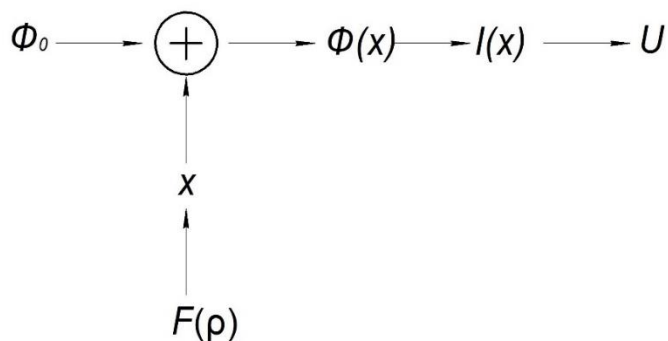


Рисунок 4.3 - Схемно-аналитическая модель преобразования оптического сигнала в измерительном преобразователе плотности

Исходя из приведенной схемно-аналитической модели преобразования оптического сигнала построены структурная (Рисунок 4.4) и функциональная (Рисунок 4.5) схемы измерительного преобразователя соответственно.

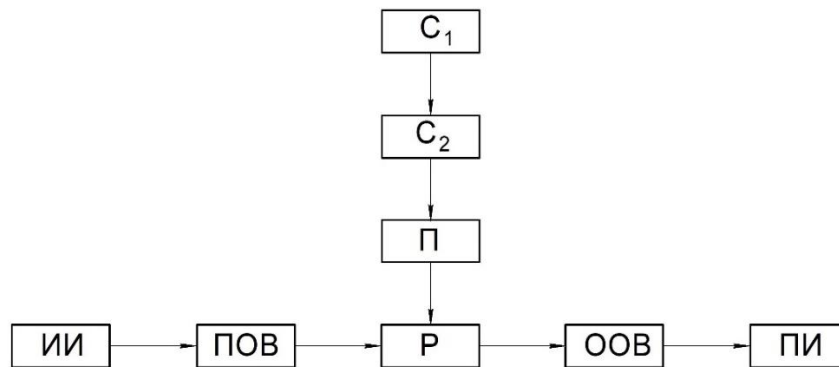


Рисунок 4.4 - Структурная схема измерительного преобразователя плотности

ИИ – источник излучения;

ПОВ – подводящее оптическое волокно;

ООВ – отводящее оптическое волокно;

ПИ – приемник излучения;

Р –растровая решетка;

C_1, C_2 – сильфоны;

П – поплавков.

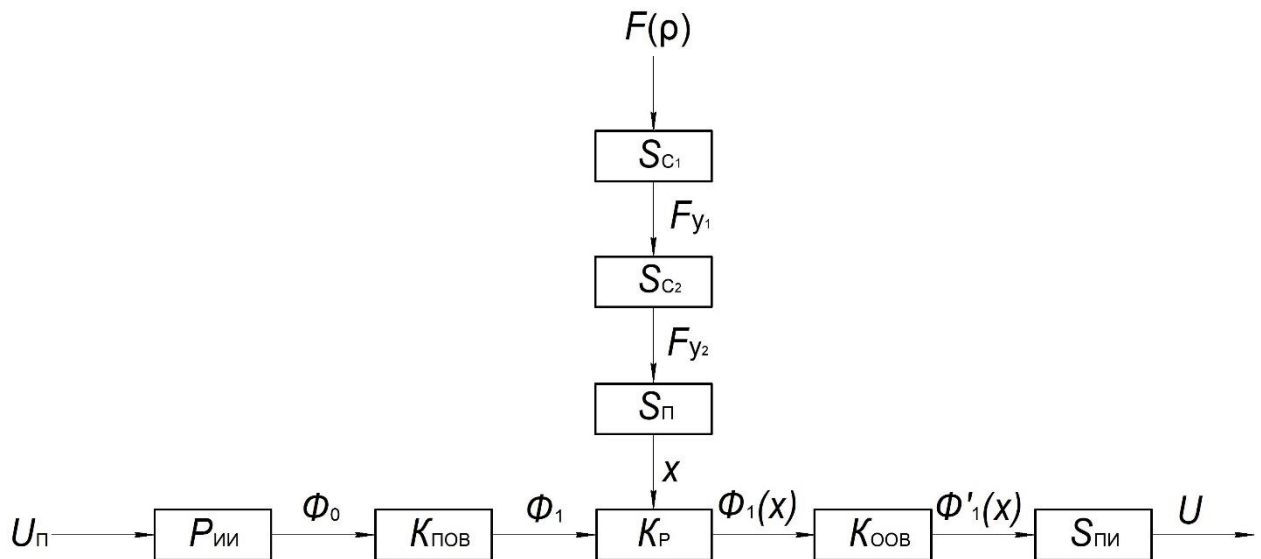


Рисунок 4.5 - Функциональная схема измерительного преобразователя
плотности жидкостей

S_{C1}, S_{C2} –чувствительность сильфонов;

$S_П$ – чувствительность поплавка;

$K_{\text{ПОВ}}$ – коэффициент передачи ИИ-ПОВ;

$K_{\text{Р}}$ – коэффициент передачи растровой решетки;

$K_{\text{ООВ}}$ – коэффициент передачи ОР-ООВ;

$S_{\text{ПИ}}$ – чувствительность приемника излучения;

$P_{\text{ИИ}}$ – мощность источника излучения.

Для анализа возможных источников погрешностей построим структурную метрологическую модель измерительного канала ВОИИС [23] (Рисунок 4.6).

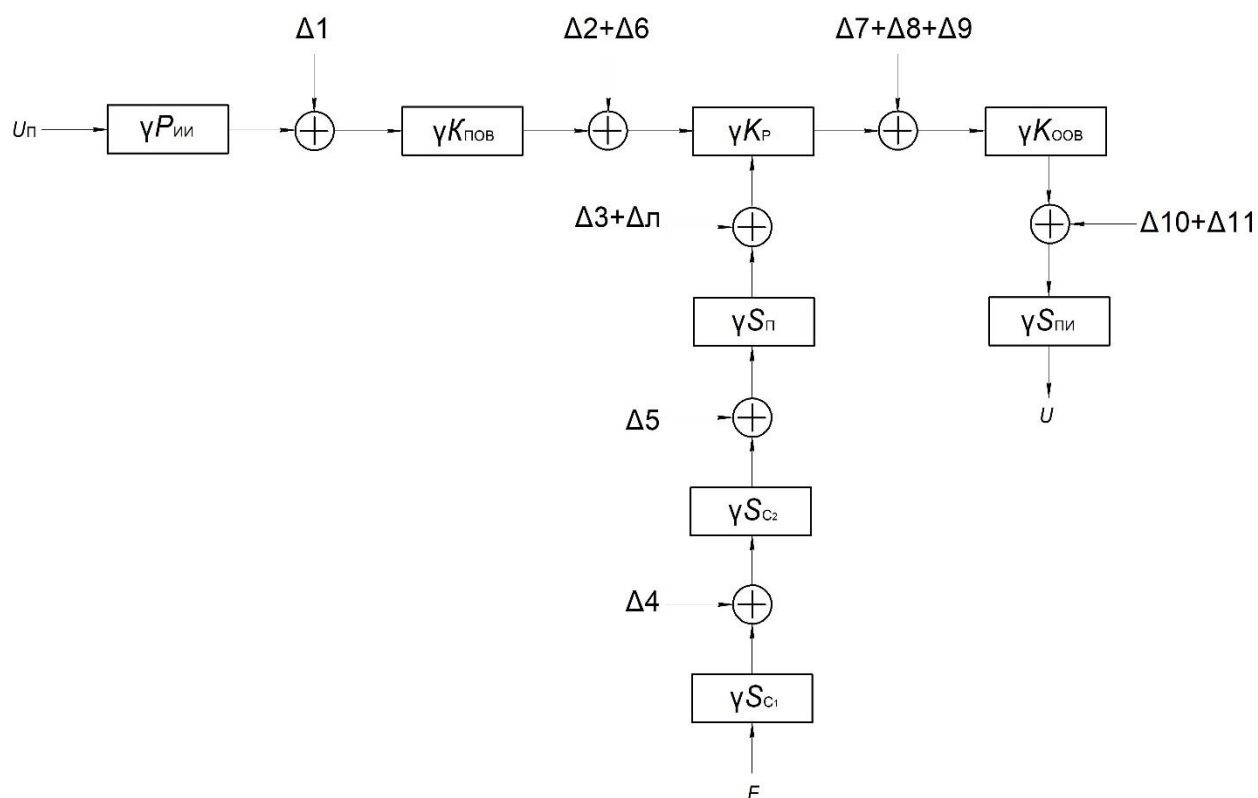


Рисунок 4.6 - Структурная метрологическая модель измерительного канала ВОИИС

где Δ_1 – погрешность, связанная с вводом излучения от источника излучения в подводящее оптическое волокно;

Δ_2 – погрешность из-за неточности расположения подводящего оптического волокна относительно растровой решетки;

Δ_3 – погрешность, связанная с неточностью изготовления поплавка;

Δ_4, Δ_5 – погрешность, связанная с неточностью изготовления сильфонов;

Δ_6 – погрешность, связанная с неточностью изготовления диафрагмы;

Δ_7 – погрешность, связанная с неточностью изготовления растровой решетки;

Δ_8 – погрешность из-за неточности расположения отводящего оптического волокна относительно растровой решетки;

Δ_9 – погрешность, вызванная неточностью установки торцов ПОВ и ООВ относительно друг друга;

Δ_{10} – погрешность, связанная с выводом излучения от отводящего оптического волокна на приемник излучения;

Δ_{11} – погрешность спектрального согласования источника и приемника излучения;

$\Delta_{\text{л}}$ – погрешность линейности функции преобразования;

$\gamma_{\text{СП}}$ – погрешность, обусловленная изменением параметров поплавка из-за изменения температуры исследуемой среды, давления и др.;

$\gamma_{\text{SC1}}, \gamma_{\text{SC2}}$ – погрешность, обусловленная изменением параметров сильфонов (первого и второго соответственно) из-за изменения температуры исследуемой среды, давления, вибраций и др.;

$\gamma_{\text{КР}}$ – погрешность, обусловленная изменением линейных размеров растровой решетки под воздействием температуры и прочих внешних воздействий;

$\gamma_{\text{РИИ}}$ – погрешность, возникающая из-за изменения мощности излучения при изменении температуры, напряжения питания и т.д.;

$\gamma_{\text{СПИ}}$ – погрешность, вызванная изменением интегральной токовой чувствительности приемника излучения при изменении температуры окружающей среды, напряжения питания и т.д.;

$\gamma_{\text{КПОВ}}, \gamma_{\text{КООВ}}$ – погрешности, возникающие из-за изменения светопропускания подводящих и отводящих оптических волокон соответственно, при изменении температуры, изгибах, вибрации и т.д. [6, 54, 66].

Мультипликативная погрешность, то есть погрешность, линейно возрастающая или убывающая с ростом измеряемой величины (погрешность чувствительности) имеет вид:

$$\gamma_S = \left(\sqrt{\gamma_{S\Pi}^2 + \gamma_{SC1}^2 + \gamma_{SC2}^2 + \gamma_{P_{\text{ИИ}}}^2 + \gamma_{K_{\text{ПОВ}}}^2 + \gamma_{K_P}^2 + \gamma_{K_{\text{ООВ}}}^2 + \gamma_{S_{\text{ПИ}}}^2} \right).$$

Аддитивная погрешность – погрешность постоянная во всем диапазоне (погрешность нуля) – имеет вид:

$$\Delta_0 = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2 + \Delta_{10}^2 + \Delta_{11}^2 + \Delta_{\text{л}}^2}.$$

Тогда абсолютная погрешность измерительного канала определяется следующим образом:

$$\Delta_{\text{ИК}} = \Delta_0 + \gamma_S x$$

или

$$\Delta_{\text{ИК}} = \left(\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2 + \Delta_{10}^2 + \Delta_{11}^2 + \Delta_{\text{л}}^2} \right) + \left(\sqrt{\gamma_{S\Pi}^2 + \gamma_{SC1}^2 + \gamma_{SC2}^2 + \gamma_{P_{\text{ИИ}}}^2 + \gamma_{K_{\text{ПОВ}}}^2 + \gamma_{K_P}^2 + \gamma_{K_{\text{ООВ}}}^2 + \gamma_{S_{\text{ПИ}}}^2} \right) x.$$

Помимо измерительного канала погрешность также вносят прочие элементы ВОИИС: блок формирования логических сигналов, счетчики, электронный нониус, устройство обработки и преобразования информации (ПЛК). Данные элементы вносят следующие погрешности:

$\Delta_{\text{оп}}$ – погрешность, обусловленная нестабильностью опорного напряжения $U_{\text{оп}}$;

$\Delta_{\text{ш}}$ – погрешность, вызванная шумами и помехами;

$\Delta_{\text{н}}$ – погрешность электронного нониуса, вызванная температурной нестабильностью потенциометрических резисторов;

$\Delta_{\text{ф}}$ – погрешность, обусловленная наличием ложных импульсов либо пропуском импульсов;

Δ_a – погрешность, вызванная неверным алгоритмом преобразования измерительной информации, некорректной интерполяцией и аппроксимацией. Тогда абсолютная погрешность, вносимая программно-аппаратной частью ВОИИС составит:

$$\Delta_{\Pi} = \sqrt{\Delta_{\text{оп}}^2 + \Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{ф}}^2 + \Delta_a^2}.$$

Абсолютная погрешность средства измерения тогда запишется как:

$$\Delta = \Delta_{\text{ИК}} + \Delta_{\Pi}$$

или

$$\begin{aligned} \Delta = & \left(\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2 + \Delta_{10}^2 + \Delta_{11}^2 + \Delta_{\text{л}}^2} + \right. \\ & \left. + \sqrt{\Delta_{\text{оп}}^2 + \Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{ф}}^2 + \Delta_a^2} \right) + \\ & + \left(\sqrt{\gamma_{S\Pi}^2 + \gamma_{SC1}^2 + \gamma_{SC2}^2 + \gamma_{P\text{ИИ}}^2 + \gamma_{K\text{ПОВ}}^2 + \gamma_{Kp}^2 + \gamma_{K\text{ООВ}}^2 + \gamma_{S\Pi\text{И}}^2} \right) x. \end{aligned}$$

Рассмотрим погрешности, которыми можно пренебречь либо свести к нулю.

Δ_1 и $\gamma_{P\text{ИИ}}$ сводятся к нулю при условии расположения ПОВ по центру излучающей площадки светодиода;

Δ_{10} расположения отводящего оптического волокна относительно приемника излучения практически равна нулю, так как излучающий торец ООВ намного меньше площади чувствительной площадки приемника излучения;

Δ_{11} ничтожно мала при корректном подборе источника и приемника излучения согласно [6];

Без учета погрешностей, которыми можно пренебречь, абсолютная погрешность имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta = & \left(\sqrt{\Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2 + \Delta_{\text{л}}^2 + \Delta_{\text{оп}}^2 + \Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{ф}}^2 + \Delta_a^2} \right) + \\ & + \left(\sqrt{\gamma_{S\Pi}^2 + \gamma_{SC1}^2 + \gamma_{SC2}^2 + \gamma_{K\text{ПОВ}}^2 + \gamma_{Kp}^2 + \gamma_{K\text{ООВ}}^2 + \gamma_{S\Pi\text{И}}^2} \right) x. \end{aligned}$$

Приведенная погрешность определяется как:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} = \frac{\Delta_0}{x_N} + \gamma_S \frac{x}{x_N},$$

где x_N – нормирующее значение.

Тогда приведенная погрешность будет иметь вид:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2 + \Delta_{\text{л}}^2 + \Delta_{\text{оп}}^2 + \Delta_{\text{ш}}^2 + \Delta_{\text{н}}^2 + \Delta_{\text{ф}}^2 + \Delta_{\text{а}}^2}}{x_N} +$$

$$+ \left(\sqrt{\gamma_{S_{\Pi}}^2 + \gamma_{S_{C1}}^2 + \gamma_{S_{C2}}^2 + \gamma_{K_{\text{пов}}}^2 + \gamma_{K_{\text{р}}}^2 + \gamma_{K_{\text{оов}}}^2 + \gamma_{S_{\text{пи}}}^2} \right) \frac{x}{x_N}.$$

Погрешности Δ_2 и Δ_8 из-за неточности начальной установки растровой решетки относительно ПОВ и ООВ могут быть максимально снижены или исключены в процессе сборки и настройки [6].

Погрешность Δ_9 незначительна, а благодаря точной настройке ПОВ и ООВ относительно друг друга (торцы должны располагаться строго друг напротив друга) может быть исключена или сведена к минимуму.

Погрешности Δ_3 , Δ_4 , Δ_5 можно существенно свести к минимуму при использовании высокоточного производства. Аналогичным образом снижаются погрешности Δ_6 посредством нанесения отверстия точного диаметра посредством микроигл и Δ_7 – посредством применения более точной технологии нанесения рисунка на кремниевую пластину, а также применения высокоточных методов, таких как лазерная резка и фотолитография для минимизации дефектов при изготовлении.

Погрешности $\gamma_{S_{\Pi}}$, $\gamma_{S_{C1}}$, $\gamma_{S_{C2}}$ могут быть снижены благодаря изготовлению поплавок и сильфонов из высокостабильных материалов с низким коэффициентом температурного расширения, например из стали марок 03X17H14M3, 10X17H13M2T.

Погрешность $\gamma_{K_{\text{р}}}$ может быть снижена за счет применения легирования кремниевой пластины раstra углеродом или германием, что повышает механическую прочность и повышает термостабильность, либо за счет

применения термостойких пленок и компенсирующих покрытий с отрицательным коэффициентом теплового расширения.

Погрешность Δ_d так же возможно снизить путем более точной настройки элементов преобразователя, а также путем подбора оптимальных параметров чувствительного элемента и преобразователя.

Погрешности $\gamma_{\text{КПОВ}}$, $\gamma_{\text{КООВ}}$ сводятся к допустимым значениям, если ВОК располагаются в одном жгуте, так как на них оказывается одинаковое воздействие, а радиус изгиба ВОК составляет [13]:

$$R_{\text{изг}} \geq \frac{n_c + n_o}{n_c - n_o} r_c,$$

где $R_{\text{изг}}$ – радиус изгиба;

n_c , n_o – коэффициенты преломления материала сердцевины и оболочки соответственно;

r_c – радиус сердцевины ОВ.

Изгибы с меньшим радиусом приводят к существенному снижению интенсивности оптического сигнала, поступающего в зону измерения или на приемник излучения.

Погрешности $\Delta_{\text{ш}}$ и $\Delta_{\text{ф}}$ могут быть сведены к нулю с помощью применения фильтрации сигналов с целью подавления шумов. Погрешность $\Delta_{\text{оп}}$ может быть исключена благодаря применению эталонных источников напряжения. Погрешность Δ_n существенно снижается с применением термостабильных потенциометрических резисторов в составе электронного нониуса. Δ_a возможно минимизировать с помощью использования многоточечной калибровки, корректного подбора интерполирующих и аппроксимирующих функций, а также возможности внедрения алгоритмов машинного обучения и нейросетевых технологий.

Кроме того, мультипликативная погрешность γ_s может быть снижена или исключена за счет проведения как первичной, так и периодической калибровки.

При выполнении всех выше приведенных условий суммарная погрешность ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей может быть сведена к минимальным значениям. Окончательная оценка погрешности информационно-измерительной системы выполняется экспериментально как в лабораторных, так и в рабочих условиях.

4.3 Методика проведения калибровки и результаты испытания системы

На международном уровне калибровка подразумевает под собой операцию, в ходе которой при заданных условиях устанавливают соотношения между значениями величин измерений, которые обеспечивают эталонные (образцовые) средства измерения, и соответствующими показаниями калибруемого средства измерения с присущими им неопределенностями, а также устанавливает соотношение, позволяющее получить результат измерения [60, 90]. Иными словами, процедура калибровки позволяет установить метрологические характеристики средств измерений путем определения соотношения между измеренной калибруемым средством измерения величиной и соответствующим значением величины, воспроизводимым эталонным или образцовым средством измерения.

Методика проведения калибровки разработанной ВОИИС в лабораторных условиях представляет собой совокупность следующих операций:

1. Калибровка системы проводится при температуре 20°C в емкости, к стенкам которой на кронштейнах крепится калибруемый датчик плотности в составе ИИС. В качестве образцового прибора используется лабораторный вибрационный плотномер ВИП-2МР для измерения плотности жидкости, в том числе нефти и жидких нефтепродуктов, в диапазоне 0 – 2000 кг/м³ с точностью 0,1 кг/м³, представленный на рисунке 4.7. Анализируемыми жидкостями являются дистиллированная вода, моторное масло, мазут, нефть

сырая, дизельное топливо, спирт 95%, бензин АИ-92, бензин АИ-95, керосин, нефтяной растворитель.



Рисунок 4.7 - Лабораторный вибрационный плотномер ВИП-2МР

2. Производится измерение плотности анализируемых жидкостей в отобранных пробах с помощью образцового лабораторного вибрационного плотномера, полученные данные записываются в соответствии с каждым типом жидкости.

3. В емкость поочередно заливаются анализируемые жидкости так, чтобы поплавков и сильфоны были полностью погружены в эту жидкость (примерно на 1-2 см ниже края емкости);

4. На устройстве ввода и отображения информации в блоке ввода данных выбирается режим «Калибровка», после чего вводится измеренное образцовым плотномером значение плотности анализируемой жидкости $\rho_{обр}$. Введенное значение записывается в калибровочную таблицу и сохраняется.

5. При неподвижности поплавка после заливания жидкости в течение 2 секунд происходит запись измеренного значения плотности $\rho_{изм}$ в калибровочную таблицу, измеренное значение сохраняется и выводится на дисплей.

Пункты 2-5 повторяются для каждого типа жидкости. Стоит отметить, что количество измерений при проведении калибровки должно составлять не менее 10, так как согласно [88] критерий надежности полностью выполняется, если вклад неопределенности не определялся из меньшего числа, чем 10 повторных наблюдений, т.е. при количестве измерений не меньше 10 коэффициент надежности равен 1. Ниже приведен пример построенной калибровочной таблицы 4.2 по полученным результатам измерения.

Таблица 4.2 - Построение калибровочной таблицы

№	Жидкость	$\rho_{20 \text{ обр.}} \text{ (кг/м}^3\text{)}$	$\rho_{20 \text{ изм.}} \text{ (кг/м}^3\text{)}$
1.	Вода дистиллированная	1001,7	999,4
2.	Моторное масло	935,4	936,3
3.	Мазут	912,1	914,7
4.	Сырая нефть	881,3	880,5
5.	Дизельное топливо	860,8	861,1
6.	Керосин	851,5	849,8
7.	Этиловый спирт 95%	810,7	812,2
8.	Бензин АИ-98	758,7	760,3
9.	Бензин АИ-92	734,6	733,9
10.	Нефтяной растворитель	680,8	682,1

Для интерполяции применяется метод наименьших квадратов, так как он является простым и эффективным инструментом для линейных моделей, но, как и все статистические методы, требует большого количества экспериментальных точек (желательно не менее 10). По введенным данным был получен график интерполяционного полинома, представленный на рисунке 4.8, где по оси X отложены значения плотности $\rho_{\text{изм}}$, полученные с помощью калибруемого плотномера в составе разработанной ВОИИС, а по оси Y – значения плотности $\rho_{\text{обр}}$, полученные с образцового лабораторного вибрационного плотномера. Как видно из графика, интерполирующая функция имеет вид полинома первой степени, то есть является линейной и имеет вид:

$$y = A_1x + A_0$$

или

$$\rho_{\text{обр}} = \rho_{\text{изм}}A_1 + A_0.$$

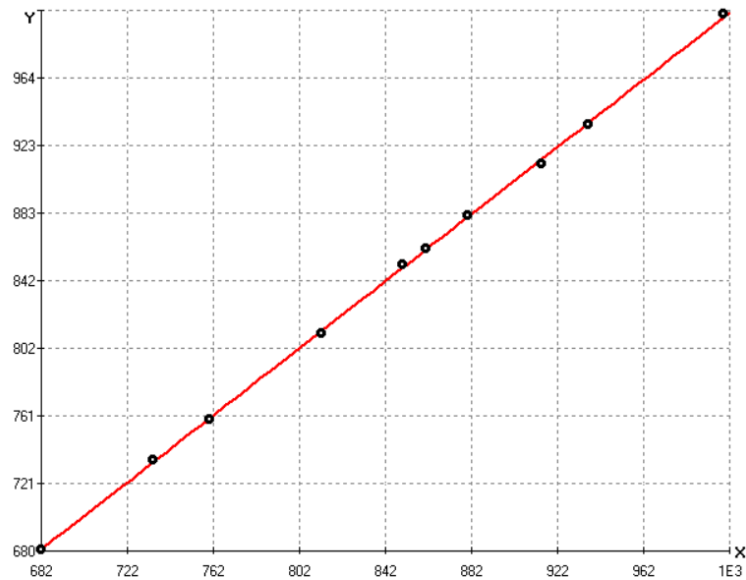


Рисунок 4.8 - Интерполяционный полином по результатам калибровки

На рисунке 4.9 приведены результаты расчета калибровочных коэффициентов A_0 и A_1 . Согласно расчетам, $A_0 = -4,569$, $A_1 = 1,005$.

Коэффициенты полинома 1 степени:

$A_0 = -4,5690835$

$A_1 = 1,0050996$

$СКО(Y) = 1,6013$

Nº	X	Y _о	Y _р	Y _р -Y _о
1	999,4	1002	999,9	1,773
2	936,3	935,4	936,5	-1,106
3	914,7	912,1	914,8	-2,695
4	880,5	881,3	880,4	0,8789
5	861,1	860,8	860,9	-0,1221
6	849,8	851,5	849,6	1,935
7	812,2	810,7	811,8	-1,073
8	760,3	758,7	759,6	-0,9081
9	733,9	734,6	733,1	1,527
10	682,1	680,8	681	-0,2093

Рисунок 4.9 - Результаты расчета калибровочных коэффициентов

6. Рассчитанные калибровочные коэффициенты A_0 и A_1 применяются для получения значения измеренной плотности с учётом данных проведенной калибровки в режиме «Измерение» согласно уравнению:

$$\rho = \rho_{\text{изм}} A_1 + A_0.$$

В соответствии с полученными калибровочными коэффициентами для исследуемого экспериментального образца уравнение примет вид:

$$\rho = 1,005\rho_{\text{изм}} - 4,569.$$

Первый ряд испытаний проводился при температуре анализируемых жидкостей $\Theta=20^\circ\text{C}$ в лабораторных условиях. В емкость поочередно заливались экспериментальные жидкости, и снимались показания с устройства управления после стабилизации поплавка и нахождения его в неподвижном состоянии в течение 2 секунд. Всего проводилось 5 экспериментов, в каждом из которых поочередно заливалась каждая анализируемая жидкость. Результаты лабораторных испытаний системы при нормальных условиях представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Результаты лабораторных испытаний системы при температуре жидкой среды $\Theta=20^\circ\text{C}$

Наименование жидкости	Значение плотности, полученное с образцового датчика, кг/м^3	Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
1. Вода дистиллированная	1000,5	999,8	999,6	1000,1	999,7	1000
2. Моторное масло	935,5	936,3	936	936,4	935,8	935,8
3. Мазут	912,2	912,4	912,5	912,8	913	913,1
4. Сырая нефть	881,5	880,7	881,7	880,7	881	880,8
5. Дизельное топливо	861	861,6	861,7	861,5	861,8	861,9
6. Керосин	851,2	851,9	851	851,9	850,4	850,9
7. Этиловый спирт 95%	811	811,3	811,7	810,4	811,1	811,8
8. Бензин АИ-98	758,8	759,6	759,2	758,2	759	759,4
9. Бензин АИ-92	734,7	735,1	734,4	734,2	734,2	733,9
10. Нефтяной растворитель	680,9	681,4	681,7	681,8	680,6	680,7

На рисунке 4.10 представлена зависимость модуля абсолютной погрешности разработанной ВОИИС при $\Theta=20^{\circ}\text{C}$.

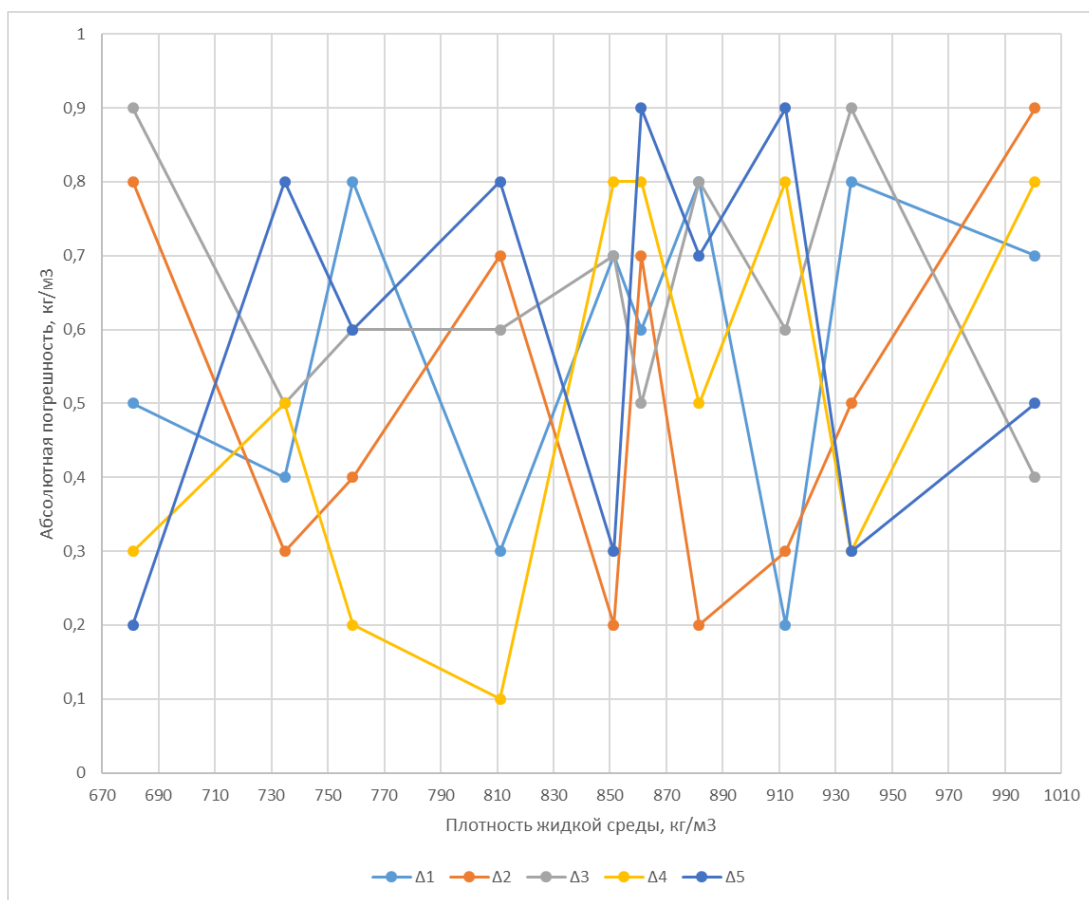


Рисунок 4.10 - Зависимость модуля абсолютной погрешности разработанной ВОИИС при $\Theta=20^{\circ}\text{C}$

Из графика на рисунке 4.10 видно, что абсолютная погрешность не превышает $\pm 0,9 \text{ кг/м}^3$.

Предыдущие экспериментальные исследования были проведены при стандартных условиях и температуре анализируемой среды $\Theta=20^{\circ}\text{C}$. Однако, плотность жидкостей зависит от температуры и понижается при нагреве. В третьей главе описан алгоритм измерения и приведения результата измерения плотности к стандартным условиям при $\Theta=15^{\circ}\text{C}$ и $\Theta=20^{\circ}\text{C}$ с применением коэффициентов температурной поправки. При проведении экспериментальных исследований при температурных условиях,

отличающихся от стандартных, использовались полученные на дисплее значения плотности, приведенные к $\Theta=20^{\circ}\text{C}$. Измерения плотности отобранных проб анализируемых жидкостей образцовым лабораторным вибрационным плотномером проводились при $\Theta=20^{\circ}\text{C}$.

Испытания разработанной ИИС проводились при следующих значениях температур: 40°C (Таблица 4.4), 65°C (Таблица 4.5), 90°C (Таблица 4.6).

Таблица 4.4 - Результаты лабораторных испытаний системы при температуре жидкой среды $\Theta=40^{\circ}\text{C}$

Наименование жидкости	Значение плотности, полученное с образцового датчика, кг/м^3	Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
1. Вода дистиллированная	1000,5	1000	1000,2	999,9	999,6	999,9
2. Моторное масло	935,5	936,1	935,9	936	936,3	936,2
3. Мазут	912,2	913,1	912,7	912,5	913,1	913
4. Сырая нефть	881,5	881,2	881,3	882,2	880,7	881,1
5. Дизельное топливо	861	861,4	861,5	861,3	861,7	860,4
6. Керосин	851,2	850,4	851,4	850,5	851,6	850,8
7. Этиловый спирт 95%	811	811,6	811,9	811,8	811,7	811,5
8. Бензин АИ-98	758,8	759,7	759,5	759	759,1	759,6
9. Бензин АИ-92	734,7	733,8	734,4	734,3	734,2	735,3
10. Нефтяной растворитель	680,9	681,4	681,6	681,5	680	681,6

На рисунке 4.11 представлены значения зависимости модуля абсолютной погрешности при $\Theta=40^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 4.11 - Зависимость модуля абсолютной погрешности разработанной ВОИИС при $\Theta=40^{\circ}\text{C}$

Эксперимент при температуре $\Theta=40^{\circ}\text{C}$ показал, что абсолютная погрешность не превышает $\pm 0,9 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 4.5 - Результаты лабораторных испытаний системы при температуре жидкой среды $\Theta=65^{\circ}\text{C}$

Наименование жидкости	Значение плотности, полученное с образцового датчика, кг/м^3	Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
1. Вода дистиллированная	1000,5	999,5	999,7	999,9	1000	1000,2
2. Моторное масло	935,5	935,9	935	936,2	936,4	936,3
3. Мазут	912,2	913,2	912,7	913,2	912,5	912,6
4. Сырая нефть	881,5	880,8	881,1	880,7	881,3	880,5
5. Дизельное топливо	861	860,7	861,5	861,7	860,3	860,7
6. Керосин	851,2	850,8	851,9	850,2	850,7	850,6
7. Этиловый спирт 95%	811	811,6	811,7	810,5	811,4	811,8
8. Бензин АИ-98	758,8	759,7	759,8	758,1	759,4	758
9. Бензин АИ-92	734,7	734,3	735,4	734,1	735,6	735,8
10. Нефтяной растворитель	680,9	681,4	681,2	681,9	680,6	681,4

На рисунке 4.12 представлена зависимость модуля абсолютной погрешности при $\Theta=65^{\circ}\text{C}$.

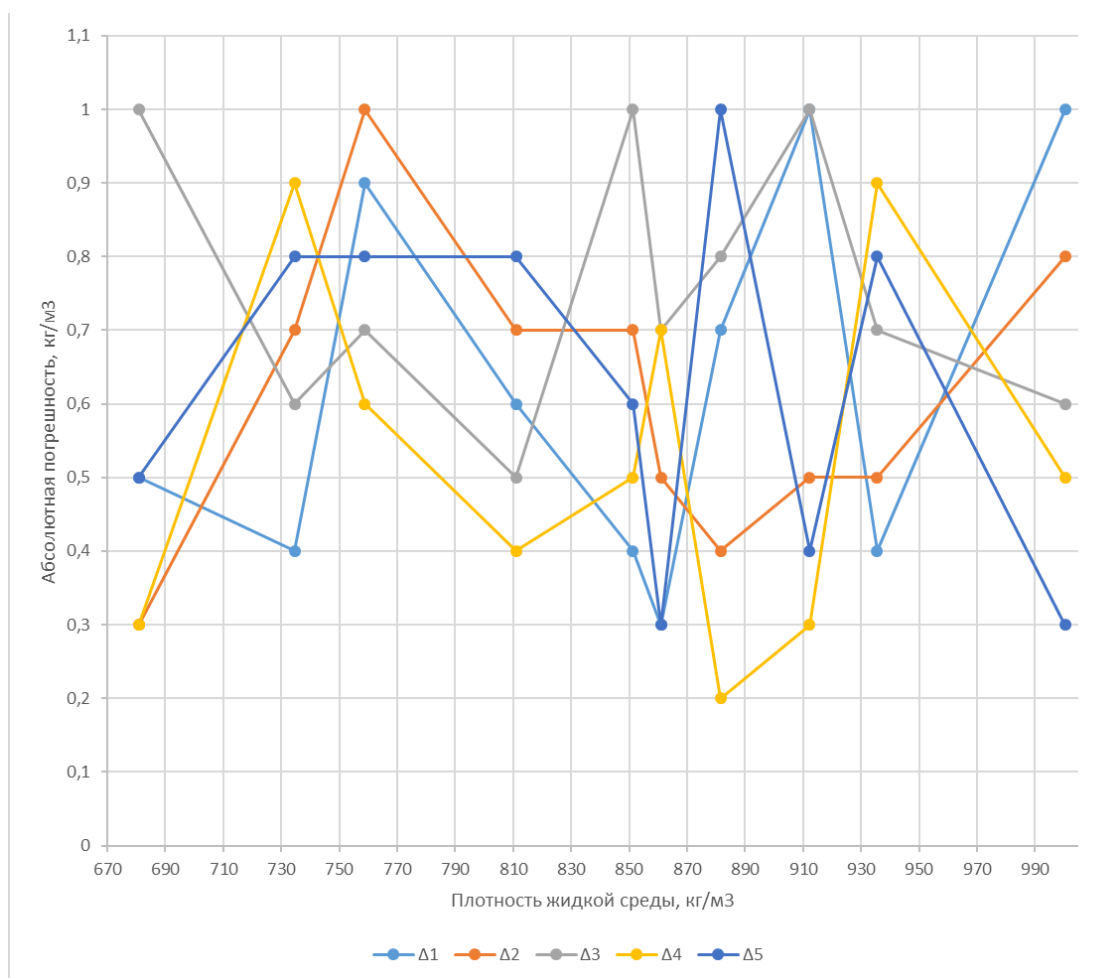


Рисунок 4.12 - Зависимость модуля абсолютной погрешности разработанной ВОИИС при $\Theta=65^{\circ}\text{C}$

Эксперимент показал, что при $\Theta=65^{\circ}\text{C}$ абсолютная погрешность составляет не более $\pm 1 \text{ кг/м}^3$.

Из перечня анализируемых жидкостей при $\Theta=90^{\circ}\text{C}$ исключаются этиловый спирт, нефтяной растворитель, а также сырая нефть и бензины АИ-92 и АИ-98 по причине кипения этих жидкостей либо их легких фракций, так как адекватно оценить точность измерения становится затруднительно.

Таблица 4.6 - Результаты лабораторных испытаний системы при температуре жидкой среды $\Theta=90^{\circ}\text{C}$

Наименование жидкости	Значение плотности, полученное с образцового датчика, кг/м^3	Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
5. Вода дистиллированная	1000,5	999,6	1000	1000,2	999,5	999,9
6. Моторное масло	935,5	935,1	935,4	935,6	935,5	935,6
7. Мазут	912,2	912,8	913,2	912,4	912,3	913
8. Дизельное топливо	861	861,9	860,4	860,5	860,9	860,2
9. Керосин	851,2	850,2	850,4	850,8	850,5	851

На рисунке 4.13 представлена зависимость модуля абсолютной погрешности при $\Theta=90^{\circ}\text{C}$.

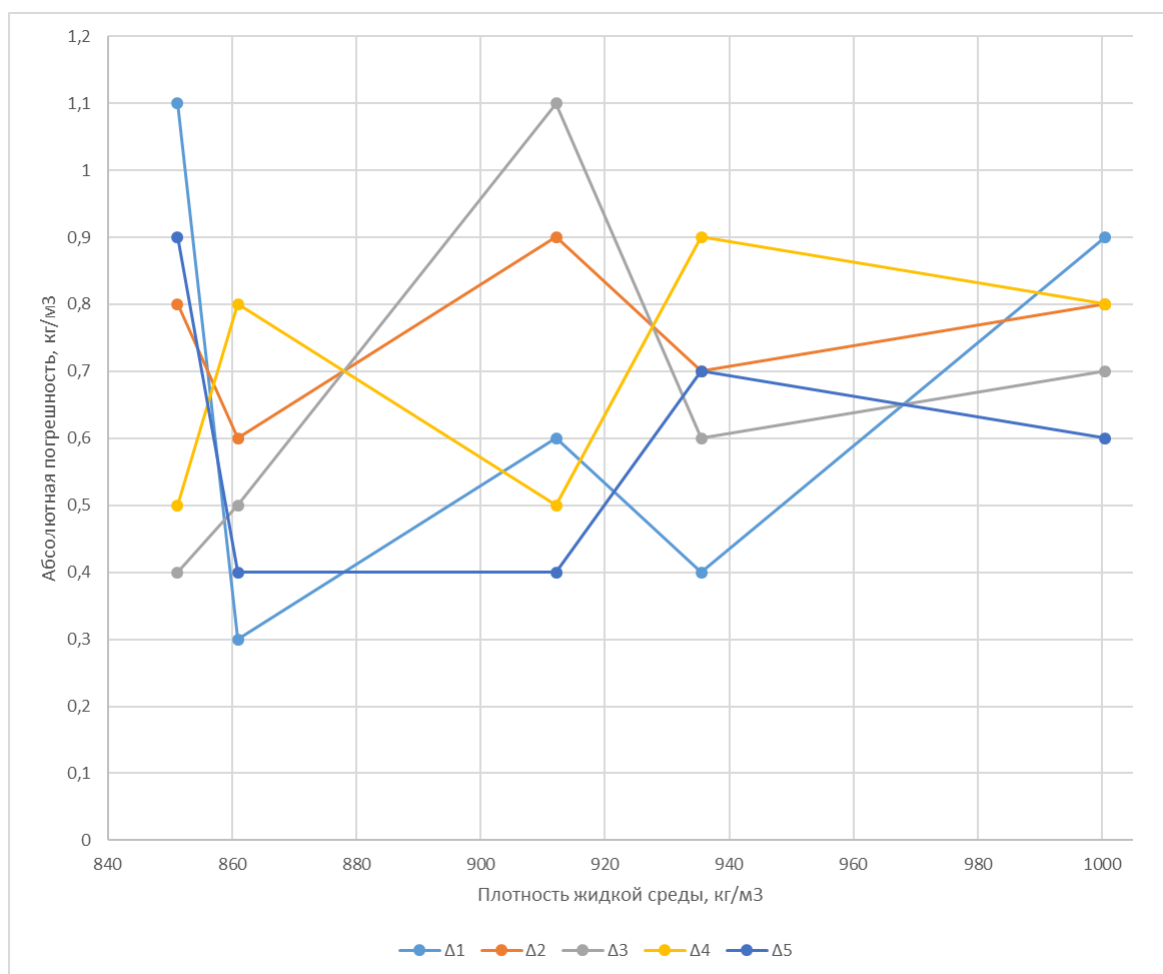


Рисунок 4.13 - Зависимость модуля абсолютной погрешности разработанной ВОИИС при $\Theta=90^{\circ}\text{C}$

При $\Theta=90^{\circ}\text{C}$ абсолютная погрешность составляет согласно экспериментальным данным не более $\pm 1,1 \text{ кг/м}^3$.

Дополнительная погрешность при изменении температуры определяется как:

$$\Delta_{\text{доп}} = \Delta_{\Theta} - \Delta_{\text{осн}},$$

где Δ_{Θ} – абсолютная погрешность при температуре Θ ,

$\Delta_{\text{осн}}$ – основная погрешность при температуре, принятой за нормальные условия.

Принимая за основную погрешность $\Delta_{\text{осн}}$ абсолютную погрешность при $\Theta=20^{\circ}\text{C}$, получим:

$$\Delta_{\text{доп}40} = \Delta_{40} - \Delta_{\text{осн}} = 0,9 - 0,9 = 0 \text{ кг/м}^3;$$

$$\Delta_{\text{доп}65} = \Delta_{65} - \Delta_{\text{осн}} = 1 - 0,9 = 0,1 \text{ кг/м}^3;$$

$$\Delta_{\text{доп}90} = \Delta_{90} - \Delta_{\text{осн}} = 1,1 - 0,9 = 0,2 \text{ кг/м}^3.$$

Таким образом, основная погрешность составляет:

$$\Delta_{\text{осн}} = 0,9 \text{ кг/м}^3; \gamma_{\text{осн}} = 0,26\%.$$

При температуре анализируемой жидкости $40^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 90^{\circ}\text{C}$ дополнительная температурная погрешность составляет:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,004 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}}; \gamma_{\text{доп}} = 0,0012 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}.$$

Характер зависимости дополнительной температурной погрешности от температуры может быть определен при наличии экспериментальных данных на всем диапазоне рабочих температур ВОИИС (минус $50...350^{\circ}\text{C}$), что требует проведения экспериментальных исследований на промышленных объектах с соответствующими температурными условиями протекания технологических процессов, либо специального оборудования и условий в лаборатории, что сложно реализуемо.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания подтверждают работоспособность и точность разработанной ИИС, поплавкового датчика плотности в ее составе и алгоритмов обработки информации в соответствии с требованиями к поплавковому способу измерения плотности жидких сред.

Для рассматриваемого экспериментального образца ВОИИС основная погрешность, т.е. погрешность при нормальных условиях, за которые была принята температура анализируемой жидкости $\Theta=20^{\circ}\text{C}$, составляет $\Delta_{\text{осн}}=\pm 0,9$ кг/м³ или $\gamma_{\text{осн}}=\pm 0,26\%$. Дополнительная температурная погрешность для температуры анализируемой среды $40^{\circ}\text{C}<\Theta\leq 90^{\circ}\text{C}$ составляет $\gamma_{\text{доп}}=\pm 0,0012\%/^{\circ}\text{C}$, однако характер зависимости дополнительной температурной погрешности может быть определен только при многократных экспериментальных исследованиях на всем диапазоне рабочих температур ВОИИС в промышленных условиях. Максимальная абсолютная погрешность, полученная при лабораторных исследованиях в диапазоне температур анализируемых жидкостей $\Theta=20\dots 90^{\circ}\text{C}$, составила $\Delta=\pm 1,1$ кг/м³, а приведенная погрешность $\gamma=\pm 0,4\%$, в то время как приведенная погрешность выпускаемых промышленных поплавковых плотномеров непрерывных измерений как используемых отдельно, так и в составе различных ИИС колеблется от $\pm 0,5$ до $\pm 2\%$. Из-за использования высокостабильных материалов и элементов волоконной оптики для изготовления измерительного преобразователя, а также отсутствия в области измерения и непосредственной близости к анализируемой среде магнитных, электрических, искрообразующих элементов, разработанная ВОИИС может применяться для определения плотности жидких взрыво- и пожароопасных сред в диапазоне рабочих температур $-50\dots 350^{\circ}\text{C}$, что соответствует условиям большинства технологических процессов хранения и переработки нефти. Полученные результаты работы системы доказывают ее работоспособность и возможность применения для автоматизированного контроля плотности пожароопасных жидкостей как при нормальных условиях, так и при высокотемпературных режимах работы, а также подтверждают ее искро-взрыво-пожаробезопасность, конкурентоспособность и целесообразность применения.

Основные выводы и результаты

1. Проведен энергетический расчет разрабатываемой ВОИИС для оценки оптических потерь, который позволил оценить оптические потери в каждом измерительном канале, которые составили 33 – 43 дБ, что не превышает допустимых пределов чувствительности используемых фотоприемников, а также доказывает искро- взрыво- пожаробезопасность разрабатываемой ВОИИС.

2. Проведен метрологический анализ ВОИИС, разработаны структурная и метрологическая структурная модели измерительного преобразователя в составе ВОИИС, позволяющие на этапе проектирования определить источники погрешностей и уменьшить их воздействие до минимально возможных значений, а также рассмотрены источники погрешностей, вносимых элементами программно-аппаратной части ВОИИС.

3. Приведена методика калибровки ВОИИС для определения плотности с использованием образцового лабораторного вибрационного плотномера. Описаны основные процедуры, такие как построение калибровочной таблицы, вывод полинома интерполяции, расчет калибровочных коэффициентов и их дальнейшее применение при измерении.

4. Проведены экспериментальные исследования разработанного образца ВОИИС в лабораторных условиях при температурах 20°C, 40°C, 65°C, 90°C и получены экспериментальные данные, которые доказывают ее работоспособность, а также подтверждают обеспечение необходимой точности в соответствии с требованиями к средствам измерения плотности поплавкового типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих методов, датчиков и измерительных систем для определения плотности жидких сред, применяемых на объектах нефтепереработки, для выявления перспектив их улучшения, таких как оперативный автоматизированный контроль за измеряемым параметром, простота конструкции и преобразования измеряемой величины, универсальность, отсутствие электрических элементов в измерительной пожароопасной среде, искро- взрыво- пожаробезопасность, возможность применения в условиях высокотемпературных технологических процессов, обеспечение необходимой точности результатов измерений.

2. Произведено математическое обоснование физических процессов, происходящих в оптико-механической системе измерительного преобразователя плотности жидкой среды, а также рассмотрены особенности распределения светового потока в открытом оптическом канале измерительного преобразователя и его модуляции с применением растровой решетки, а также влияние дифракции при прохождении светового потока через круглое отверстие диафрагмы. Рассчитаны оптимальные расстояния взаимного расположения элементов оптического канала измерительного преобразователя.

3. Определена функциональная зависимость между перемещением поплавка и плотностью жидкой среды, а также рассмотрены особенности преобразования значения перемещения в информационный сигнал для его дальнейшей обработки с применением растровой решетки и амплитудно-логического преобразования сигнала.

4. Разработано техническое решение ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей на основе поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем в его

составе, включающего в себя поплавков, закрепленный на сильфонах, растровую решетку и две пары подводящих и отводящих оптических волокон, обеспечивающее простоту и компактность конструкции, отсутствие электрических элементов в измерительной среде, простоту преобразования измерительной информации, диапазон рабочих температур (от минус 50 до 350°C), соответствующий требованиям большинства технологических процессов транспорта и переработки нефти.

5. Разработана структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с поплавковым датчиком плотности в ее составе, позволяющей оперативно производить измерение плотности жидких сред в автоматизированном режиме.

6. Разработан алгоритм функционирования ВОИИС с режимами калибровки и измерения плотности, учитывающий конструктивные параметры измерительного преобразователя, полученные калибровочные коэффициенты и температурную поправку плотности при преобразовании перемещения поплавка в искомое значение плотности жидкости.

7. Проведен анализ ВОИИС с целью оценки оптических потерь и определения основных источников погрешностей, который позволил оценить оптические потери в каждом измерительном канале, которые составили 33 – 43 дБ, доказана искро- взрыво- пожаробезопасность разрабатываемой ВОИИС, а также определены основные источники погрешностей и способы их минимизации и устранения. Проведены экспериментальные исследования ВОИИС для определения плотности жидких сред, которые доказывают ее работоспособность, а также подтверждают обеспечение необходимой точности в соответствии с требованиями к средствам измерения плотности поплавкового типа. Для рассматриваемого экспериментального образца ВОИИС основная погрешность составляет $\Delta_{\text{осн}} = \pm 0,9 \text{ кг/м}^3$ или $\gamma_{\text{осн}} = \pm 0,26\%$. Максимальная абсолютная погрешность, полученная при лабораторных исследованиях в диапазоне температур анализируемых жидкостей $\Theta = 20 \dots 90^\circ\text{C}$, составила $\Delta = \pm 1,1 \text{ кг/м}^3$, а приведенная погрешность - $\gamma = \pm 0,4\%$,

что меньше, чем у существующих поплавковых плотномеров и ИИС с их использованием. Дополнительная температурная погрешность в диапазоне температуры анализируемой среды $40^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 90^{\circ}\text{C}$ составляет $\gamma_{\text{доп}} = \pm 0,0012\%/^{\circ}\text{C}$. Произведены реализация разработанной ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей и ее внедрение.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГЗС – автомобильная газозаправочная станция

АЗС – автомобильная заправочная станция

ВОИИС – волоконно-оптическая информационно-измерительная система

ВОК – волоконно-оптический кабель

ИИ – источник излучения

ИИС – информационно-измерительная система

ИК – инфракрасный (касаемо излучения, спектра излучения)

МПК – микропроцессорный контроллер

НПЗ – нефтеперерабатывающий завод

ОВ – оптическое волокно

ООВ – отводящее оптическое волокно

ОР – оптический разъем.

ПИ – приемник излучения

ПК – персональный компьютер

ПОВ – подводящее оптическое волокно

ППП – первичный преобразователь параметров

СУГ – сжиженный углеводородный газ

УВОИ – устройство ввода и отображения информации

УОиПИ – устройство обработки и преобразования информации

УОС – устройство обработки сигналов

ЭВМ – электронная вычислительная машина

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алейник, А. С. Основы схемотехники приемопередающих электронных устройств / А. С. Алейник [и др.]. — СПб.: Университет ИТМО, 2021. — 149 с.
2. Астапов, В. Н. Оптоэлектронное устройство для измерения плотности жидкости с оптоволоконными линиями связи : пат. 206142 Рос. Федерация / В. Н. Астапов, Ю. В. Гашенко. — Бюл. № 24. — 2021.
3. Астапов, В. Н. Устройство для измерения плотности жидкости с оптоволоконным преобразователем : пат. 196684 Рос. Федерация / В. Н. Астапов [и др.]. — Бюл. № 8. — 2020.
4. Астапов, В. Н. Устройство с оптоволоконным преобразователем для измерения плотности жидкости в нефтеперерабатывающей отрасли / В. Н. Астапов, А. А. Гашенко, Ю. В. Гашенко // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 3. — С. 23–25.
5. Бадеева, Е. А. Разработка теории распределения светового потока в оптической системе волоконно-оптических преобразователей физических величин отражательного типа: монография / Е. А. Бадеева [и др.]. — Пенза: ИИЦ ПГУ, 2008. — 101 с.
6. Бадеева, Е. А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом / Е. А. Бадеева [и др.]. — М.: Московский государственный университет леса, 2004. — 246 с.
7. Бегунов, В. Н. Устройство для измерения плотности : пат. 2069344 Рос. Федерация / В. Н. Бегунов, Ю. П. Жуков. — Бюл. № 32. — 1996.
8. Бойко, В. В. Устройство для измерения плотности жидкости : а. с. 1689795 СССР / В. В. Бойко, А. П. Васьковцов. — Бюл. № 41. — 1991.

9. Борисов, В. Б. Плотномер с магнитным поплавком / В. Б. Борисов // Приборы и техника эксперимента. — 1995. — № 3. — С. 166–171.
10. Борисов, В. Б. Универсальная полуавтоматическая установка для измерения вязкости и плотности жидкостей / В. Б. Борисов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 1994. — № 3. — С. 167–176.
11. Бражников, Н. И. Ультразвуковые методы измерения плотности / Н. И. Бражников // Приборы и системы управления. — 1976. — № 10. — С. 17–21.
12. Бурсов, М. В. Моделирование формирования оптического изображения: учеб. пособие / М. В. Бурсов [и др.]. — СПб.: НИУ ИТМО, 2011. — 141 с.
13. Вейнберг, В. Б. Оптика световодов / В. Б. Вейнберг, Д. К. Сатаров. — Л.: Машиностроение, 1977. — 320 с.
14. Вилисов, А. А. Светодиоды и светотехнические устройства: учеб. пособие / А. А. Вилисов, В. С. Солдаткин, В. И. Туев. — М.: ТУСУР, 2020. — 112 с.
15. Власов, В. В. К вопросу анализа вибрационных плотномеров / В. В. Власов [и др.]. — Саратов : Саратовский гос.-техн. университет, 1997. — 13 с. — Деп. в ВИНТИ № 1196-B97.
16. Волченко, Ю. А. Устройство для контроля плотности и массовой доли жидкой фазы пульпы в трубопроводах : пат. 2082152 Рос. Федерация / Ю. А. Волченко. — Бюл. № 17. — 1997.
17. Воробьев, В. А. Гамма-плотнометрия / В. А. Воробьев [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 144 с.
18. Галкин, А. С. Плотномер : пат. 2273838 Рос. Федерация / А. С. Галкин [и др.]. — Бюл. № 10. — 2006.
19. Гаузнер, С. И. Измерение массы, объема и плотности / С. И. Гаузнер [и др.]. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 528 с.

20. Гашенко, Ю. В. Аналитический обзор и исследование устройств и методов измерения плотности жидкости / Ю. В. Гашенко, В. Н. Астапов // Научное обозрение. Технические науки. — 2019. — № 6. — С. 21–27.
21. Гашенко, Ю. В. Безопасное измерение плотности пожароопасных жидкостей в нефтегазовой промышленности с применением волоконно-оптических систем / Ю. В. Гашенко, А. А. Гашенко // Актуальные вопросы обеспечения безопасности жизнедеятельности : межвуз. сб. науч. тр. — Самара : СамГТУ, 2021. — С. 13–16.
22. Гашенко, Ю. В. Математическая модель механической системы поплавкового преобразователя плотности жидких сред / Ю. В. Гашенко // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП–2024) : материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, 30 окт. – 1 нояб. 2024 г. / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2024. – С. 62–64.
23. Гашенко, Ю. В. Метрологический анализ системы измерения плотности пожароопасных жидкостей с применением волоконно-оптического преобразователя / Ю. В. Гашенко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2024. — Т. 20, № 2. — С. 152–161.
24. Гашенко, Ю. В. Оптоэлектронный прибор с волоконно-оптическими линиями связи для измерения плотности пожароопасных жидкостей / Ю. В. Гашенко, В. Н. Астапов // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 11. — С. 50–52.
25. Гашенко, Ю. В. Особенности распределения светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя плотности жидких сред с открытым оптическим каналом / Ю. В. Гашенко [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2022. — № 5. — С. 62–64.
26. Гашенко, Ю. В. Применение оптоволоконных систем для измерения плотности жидких сред в нефтегазовом комплексе / Ю. В. Гашенко, А. А. Гашенко // Научные исследования и разработки: новое и актуальное :

материалы X Междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2021. — С. 146–151.

27. Гашенко, Ю. В. Разработка волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей / Ю. В. Гашенко // Ашировские чтения. – 2024. – Т. 2, № 1(16). – С. 532–536.

28. Гашенко, Ю. В. Энергетический расчет оптического тракта волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности жидких сред / Ю. В. Гашенко // Advances in Science and Technology : сб. ст. LXIII междунар. науч.-практ. конф. — М. : ООО «Актуальность.РФ», 2024. — С. 22–26.

29. Гойхман, С. Я. Весовые и поплавковые плотномеры / С. Я. Гойхман // Приборы и системы управления. — 1975. — № 12. — С. 20–24.

30. ГОСТ 10227–2013. Топлива для реактивных двигателей. — М. : Стандартинформ, 2014.

31. ГОСТ 305–2013. Топливо дизельное. — М. : Стандартинформ, 2014.

32. ГОСТ 31610.28–2017 (ИЕС 60079-28:2015). Взрывоопасные среды. Защита оборудования и передающих систем, использующих оптическое излучение. — М. : Стандартинформ, 2018.

33. ГОСТ 32513–2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. — М. : Стандартинформ, 2014.

34. ГОСТ 32513–2023. Бензин автомобильный. — М. : Стандартинформ, 2023.

35. ГОСТ 3900–2022. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности. — М. : Стандартинформ, 2022.

36. ГОСТ 8.599–2010. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Плотность светлых нефтепродуктов. Таблицы пересчета. — М. : Стандартинформ, 2011.

37. ГОСТ 8.602–2010. Плотность нефти (Таблицы пересчета). — М. : Стандартиформ, 2011.
38. ГОСТ Р 50753–95. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из специальных сталей и сплавов. Общие технические условия. — М. : Изд-во стандартов, 1995.
39. Гребенников, В. М. Устройство для измерения плотности жидких сред : пат. 2083968 Рос. Федерация / В. М. Гребенников [и др.]. — Бюл. № 19. — 1997.
40. Гречишников, В. М. Схемотехника волоконно-оптических устройств : учеб. пособие / В. М. Гречишников. — Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2018. — 172 с.
41. Григорьева, Н. А. Методические указания по выполнению лабораторной работы «Определение плотности нефтепродуктов» / Н. А. Григорьева [и др.]. — М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2016. — 8 с.
42. Гусейнов, Т. К. Исследование влияния давления жидкости на частоту колебаний резонатора вибрационного плотномера / Т. К. Гусейнов // Известия вузов. Приборостроение. — 1998. — № 9. — С. 45–46.
43. Гусейнов, Т. К. Исследование камертонного резонатора замкнутого типа вибрационно-частотного плотномера жидкости / Т. К. Гусейнов // Автоматизация и современные технологии. — 1998. — № 4. — С. 2–5.
44. Демин, Е. А. Измерение плотности жидкости весовым плотномером / Е. А. Демин [и др.] // Приборы и системы управления. — 1975. — № 12. — С. 18–19.
45. Евстигнеев, А. Н. Электрические времяимпульсные плотномеры / А. Н. Евстигнеев, И. А. Замыцкий. — Л. : Энергоиздат, 1982. — 112 с.
46. Жуков, Ю. П. Вибрационные плотномеры / Ю. П. Жуков. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 144 с.

47. Зарецкий, Л. И. Методика градуировки и поверки радиоизотопного плотномера / Л. И. Зарецкий // Приборы и системы управления. — 1976. — № 10. — С. 23–24.
48. Иванов, В. И. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы : справ. / В. И. Иванов [и др.]. — 2-е изд. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 448 с.
49. Ивашин, А. Ф. Новые конструктивные схемы гидростатических плотномеров / А. Ф. Ивашин [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2000. — № 2. — С. 62–65.
50. Идрисов, Р. Ф. Повышение эффективности ввода лазерного излучения в волоконно-оптический световод с помощью согласующих микролинз / Р. Ф. Идрисов // Приоритетные научные направления: от теории к практике. — 2016. — № 22. — С. 148–152.
51. Кивилис, С. С. Направления развития промышленных плотномеров / С. С. Кивилис // Приборы и системы управления. — 1975. — № 12. — С. 14–18.
52. Кивилис, С. С. Плотномеры / С. С. Кивилис. — М. : Энергия, 1980. — 280 с.
53. Конюхов, Н. Е. Оптоэлектронные контрольно-измерительные устройства / Н. Е. Конюхов [и др.]. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 152 с.
54. Коротаев, В. В. Энергетический расчет ОЭП : учеб. пособие / В. В. Коротаев, В. Л. Мусяков. — СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2006. — 44 с.
55. Кравец, Б. К. Поплавковый плотномер с пневмопреобразователем / Б. К. Кравец [и др.] // Приборы и системы управления. — 1976. — № 9. — С. 32–33.
56. Кривулин, Н. П. Разработка теории распределения светового потока в оптической системе волоконно-оптических преобразователей физических величин отражательного типа : моногр. / Н. П. Кривулин. — Пенза: ПГУ, 2008. — 195 с.

57. Круглов, В. В. Волоконно-оптический датчик давления / В. В. Круглов, А. Г. Годнев // Приборы и системы управления. — 1993. — № 5.
58. Лавренчик, В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов : учеб. пособие / В. Н. Лавренчик. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 272 с.
59. Матвеев, Л. В. Радиоизотопный концентратомер-плотномер РКП-1 / Л. В. Матвеев [и др.] // Приборы и системы управления. — 1976. — № 10. — С. 22–23.
60. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины. — 2-е изд. — СПб. : НПО «Профессионал», 2010. — 82 с.
61. Мельничук, О. В. Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред / О. В. Мельничук, А. Н. Ермолаев // Метрология и информационно-измерительные устройства. — 2017. — Т. 13, № 4. — С. 92–97.
62. Михайлин, В. С. Устройство для измерения плотности жидких сред : пат. 2084864 Рос. Федерация / В. С. Михайлин [и др.]. — Бюл. № 20. — 1997.
63. Мордасов, Д. М. Способ измерения плотности : пат. 2162596 Рос. Федерация / Д. М. Мордасов [и др.]. — Бюл. № 3. — 2001.
64. Мороховский, А. С. Анализ погрешностей весовых плотномеров для трубопроводного гидротранспорта / А. С. Мороховский // Приборы и системы управления. — 1975. — № 12. — С. 27–29.
65. Мурашкина, Т. И. Волоконно-оптические приборы и системы: науч. разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева. — СПб. : Политехника, 2018. — 187 с.
66. Мурашкина, Т. И. Установка для исследования физических процессов, происходящих в оптико-механической системе волоконно-оптических датчиков / Т. И. Мурашкина [и др.] // Инновации на основе

информационных и коммуникационных технологий. — 2015. — № 1. — С. 424–426.

67. Назарова, И. Т. Волоконно-оптические датчики физических величин [Электронный ресурс] / И. Т. Назарова [и др.] // Материалы VI Саратовского салона изобретений. — Саратов, 2011.

68. Налимов, А. Г. Расчет тремя методами интенсивности цилиндрического векторного пучка в остром фокусе / А. Г. Налимов [и др.] // Компьютерная оптика. — 2023. — Т. 47, № 5. — С. 734–741.

69. Никоноров, Н. В. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна : учеб. пособие / Н. В. Никоноров, А. И. Сидоров. — СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. — 130 с.

70. Осипчук, И. П. Ареометрический датчик плотности: пат. 187661 Рос. Федерация / И. П. Осипчук, Ю. В. Ремизов. — Бюл. № 8. — 2019.

71. Ощепков, Д. И. Способ измерения плотности жидкости : пат. 2091756 Рос. Федерация / Д. И. Ощепков. — Бюл. № 27. — 1997.

72. Парфенов, В. И. Классификация методов измерения плотности жидкостей / В. И. Парфенов // Приборы и системы управления. — 1977. — № 5. — С. 38–39.

73. Парфенов, В. И. Температурная компенсация в гидростатических плотномерах / В. И. Парфенов // Приборы и системы управления. — 1976. — № 10. — С. 24–25.

74. Подгорнов, В. А. Устройство для измерения плотности жидкости: пат. 2095785 Рос. Федерация / В. А. Подгорнов, В. Р. Казаков. — Бюл. № 31. — 1997.

75. Попов, В. Д. Поплавковый первичный преобразователь плотности и вязкости жидкости / В. Д. Попов, В. С. Снегов // Измерительная техника. — 2001. — № 10. — С. 45–47.

76. Р 50.2.075–2010. ГСИ. Нефть и нефтепродукты. Лабораторные методы измерения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API.

77. Романов, В. И. Устройство для измерения плотности жидкости : пат. 2082151 Рос. Федерация / В. И. Романов [и др.]. — Бюл. № 17. — 1997.
78. Рудик, М. П. Радиоизотопный метод измерения плотности криогенных жидкостей / М. П. Рудик [и др.] // Приборы и системы управления. — 1976. — № 10. — С. 21–22.
79. Рыбаков, В. В. Весовой плотномер АВП-1 / В. В. Рыбаков, Б. А. Грачев // Приборы и системы управления. — 1975. — № 12. — С. 19–20.
80. Сербин, Ю. Ф. Способ определения плотности жидких суспензий: пат. 2141641 Украина / Ю. Ф. Сербин, Г. И. Бринцев. — Бюл. № 32. — 1999.
81. Сусарев, С. В., Гашенко, Ю. В. Программный комплекс для измерения плотности жидких сред : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024662032 Рос. Федерация / С. В. Сусарев, Ю. В. Гашенко. — 2024.
82. Сухов, Е. Г. Экспресс-гамма-плотнометрия на обратно рассеянном излучении / Е. Г. Сухов [и др.] // Приборы и системы управления. — 1999. — № 6. — С. 52–55.
83. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики / Э. Удд. — М. : Техносфера, 2008. — 520 с.
84. Ураксеев, М. А. Плотномер для жидкости / М. А. Ураксеев, П. Р. Исматуллаев // Приборы и системы управления. — 1975. — № 12. — С. 29–30.
85. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов : учебник / В. И. Феодосьев. — 16-е изд. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 543 с.
86. Филин, А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела : сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. II / А. П. Филин. — М. : Наука, 1978. — 616 с.
87. Хачков, А. А. Устройство для определения плотности жидкости : пат. 2089881 Рос. Федерация / А. А. Хачков. — Бюл. № 25. — 1997.
88. ЕА-4/02. Оценка неопределенности измерения при калибровках.

89. Jason, J. Theory and applications of coupling based intensity modulated fibre-optic sensors. — Mittuniversitet, 2023. — 63 p.
90. JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition).
91. Wankhede, S. D. Design and analysis aspect of metal expansion bellows: A review / S. D. Wankhede, S. H. Gawande // Forces in Mechanics. — 2023. — Vol. 13.

Листинг программы

«Программный комплекс для измерения плотности жидких сред»,
реализованной на языке C в среде разработки IAR Embedded Workbench

Meter_to_density.c

```
#include "iom8515.h"
#include "Meter_to_density.h"
#include "Global_variables.h"
#include "LCD_Display.h"
#include "Functions_of_the_general_use.h"
#include "Keyboard.h"
#include "Eeprom.h"
#include "Device_K580VI53.h"
#include "Device_KR580IR82.h"
#include "Phrases.h"

unsigned char flag_symbol = 0, flag_block_point = 0, flag_moving_bob = 0;
unsigned char set_flag_symbol = 0x00;
unsigned char up_down_counter_main = 0, up_down_counter = 0,
up_down_counter_type_liquids = 0,
counter_Enter = 0, up_down_counter_calibration_table_delete = 0;
unsigned char counter_0_cross_zero = 0, counter_1_cross_zero = 0;
unsigned char new_counter_0_cross_zero = 0, new_counter_1_cross_zero = 0;
unsigned int timer_counter = 0;
unsigned char timer_for_display = 0;
unsigned int start_value_counter_0 = 0, start_value_counter_1 = 0;
unsigned int medium_value_counter_0 = 0, medium_value_counter_1 = 0;
unsigned int end_value_counter_0 = 0, end_value_counter_1 = 0;
unsigned char current_address = start_address_position;
unsigned char copy_current_address = start_address_position;
unsigned char current_position_array;
unsigned char amount_incorporated_element_density = 0,
amount_incorporated_element_temperature = 0;
unsigned char COMMON_ARRAY[8] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
unsigned char DENSITY[MAX_NUMBER_SYMBOL_DENSITY_ARRAY + 1] = {0, 0, 0, 0, 0};
unsigned char TEMPERATURE[MAX_NUMBER_SYMBOL_TEMPERATURE_ARRAY + 1]
= {0, 0, 0, 0, 0};
float copy_moving_bob = 0;
unsigned char correction_density = 0;
unsigned char nonius_data;
#pragma vector = TIMER0_OVF_vect
__interrupt void Timer0_interrupt(void)
```

```

{
    timer_counter++;
    timer_for_display++;
    Scanning_bob();
}

#pragma vector = TIMER1_OVF_vect
__interrupt void Timer1_interrupt(void)
{
    Keyboard();
}

void main(void)
{
    MCUCR = 0x00;
    SFIOR = 0x00;
    SREG = 0x00;           //Status Register All interrupt enable (7 bit = 1)
    GICR = 0x01;           //External interrupt INT0 (bit6), INT1 (bit7), INT2 (bit5) and Boot Loader
                            //Sector is disable (bit = 0)

    TIMSK = 0x82;          //Timer/Counter Interrupt Mask Register (Timer/Counter0 (bit 1) and
                            //Timer/Counter1 (bit 7) overflow interrupt enable)

    TCCR0 = 0x00;          //Timer/Counter0 Control Register      (Normal Mode, Fosc = off)
    TCCR1B = 0x01;         //Timer/Counter1 Control Register (Normal Mode, Fosc/1)
    TCNT0 = 0x00;          //Timer/Counter Register
    ACSR = 0x80;           //Analog Comparator Control and Status Register (interrupt disable)
    UCSRB = 0x00;          //USART Control and Status Register B   (interrupt disable)
    SPCR = 0x00;           //SPI Control Register      (SPI interrupt disable)
    //Настройка PORTA на выход
    DDRA = 0xFF;
    PORTA = 0x00;
    //Настройка PORTB на выход
    DDRB = 0xFF;
    PORTB = 0x0C;
    //Настройка PORTC на вход
    DDRC = 0x00;
    PORTC = 0x00;
    //Настройка PORTD на выход
    DDRD = 0xDF;           //Bit PD5 as input
    PORTD = 0xE0;
    //Настройка PORTE на вход
    DDRE = 0x00;
    PORTE = 0x07;
    Adjusting_channel(chanal_0);
    Device_K580VI53_write_counter(0, 0xFFFF);
    Adjusting_channel(chanal_1);
    Device_K580VI53_write_counter( 1, 0xFFFF);
    Initialization_display();
    Conclusion_phrases(Kvant_PB, 13, 0);
    SREG |= 0x80;          //All interrupt enable (7 bit = 1)
    if((PIND & 0x20) == 0x00)

```

```

{
//Стирание калибровочной таблицы
Table_erase();
};

while(1)
{
switch(mode)
{
case Logo:
Logo_function();
break;
case View_Menu:
Select_mode();
break;
case Calibration:
switch(step_calibration)
{
case CalibrationMenu:
Calibration_function();
break;
case Calibration_entering_density:
Entering_to_density_function();
break;
case Calibration_save:
switch(step_save)
{
case displacement:
Detecting_moving_bob();
break;
case S_Determination_L:
Moving_bob();

break;
default:
step_save = displacement;
break;
};
break;
default:
step_calibration = Calibration_Menu;
break;
};
break;
case Measurement:
switch(step_measurement)
{
case Measurement_Menu:
Measurement_function();
break;
case Measurement_entering_temperature:
Entering_to_temperature_function();
break;

```

```

case Measurement_Type_liquids:
Choose_type_liquids();
break;
case Measurement_Start:
switch(step_start)
{
case displacement:
Detecting_moving_bob();
break;
case St_Density:
Measurement_density();
break;
default:
step_start = displacement;
break;
};
break;
default:
step_measurement = Measurement_Menu;
break;
};
break;
default:
mode = Logo;
Conclusion_phrases(Kvant_PB, 13, 0);
break;
};
};
}
//Функция заставки
void Logo_function(void)
{
if((key_flag & 0x04) == flag_S3)
{
key_flag &= 0xF0; //All keys
mode = View_Menu;
Conclusion_phrases(Kalibrovka, 10, (up_down_counter_main + 1));
};
}
//Функция выбора режима
void Select_mode(void)
{
if((key_flag & 0x01) == flag_S1)
{
key_flag &= 0xFE;
if(up_down_counter_main != 0)
{
up_down_counter_main--;
//Перевод указателя
Conclusion_phrases(Kalibrovka, 10, (up_down_counter_main + 1));
};
};
};

```

```

if((key_flag & 0x02) == flag_S2)
{
key_flag &= 0xFD;
if(up_down_counter_main < 1)
{
up_down_counter_main++;
//Перевод указателя
Conclusion_phrases(Izmerenie, 9, (up_down_counter_main + 1));
};
};

if((key_flag & 0x04) == flag_S3)
{
key_flag &= 0xFB;
};
if((key_flag & 0x08) == flag_S4)
{
key_flag &= 0xF7;
unsigned char zero_byte;
switch(up_down_counter_main)
{
case 0:
mode = Calibration;
step_calibration = Calibration_Menu;
up_down_counter = 0;
//Надпись "Ввод плотности"
Conclusion_phrases(Vvod_plotnosti, 14, (up_down_counter + 1));
break;
case 1:
zero_byte = EEPROM_read_one_byte(0);
if((3 <= zero_byte) && (zero_byte <= 50))
{
mode = Measurement;
step_measurement = Measurement_Menu;
up_down_counter = 0;
//Надпись "Ввод температуры"
Conclusion_phrases(Vvod_temperatury, 12, (up_down_counter + 1));
};
break;
default:
up_down_counter_main = 0;
break;
};
};
}
//Функция калибровки void Calibration_function(void)
{
if((key_flag & 0x01) == flag_S1)
{
key_flag &= 0xFE;
if(up_down_counter != 0)
{

```

```

up_down_counter--;
//Перевод указателя
switch(up_down_counter)
{
case 0:
Conclusion_phrases(Vvod_plotnosti, 14, (up_down_counter + 1));
break;
default:
up_down_counter = 0;
break;
};
};
};
if(key_flag&0x02)==flag_S2)
{
key_flag &= 0xFD;
if(up_down_counter < 1)
{
up_down_counter++;
//Перевод указателя
switch(up_down_counter)
{
case 1:
Conclusion_phrases(Save, 9, (up_down_counter + 1));
break;
default:
up_down_counter = 0;
break;
};
};
};
if((key_flag & 0x04) == flag_S3)
{
key_flag &= 0xFB;
amount_incorporated_element_density = 0;
for(unsigned char N = 0; N <= MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY; N++)
{
DENSITY[N] = 0;
};
mode = View_Menu;
Conclusion_phrases(Kalibrovka, 10, (up_down_counter_main + 1));
};
if((key_flag & 0x08) == flag_S4)
{
key_flag &= 0xF7;
unsigned char zero_byte;
switch(up_down_counter)
{
case C_Entering_to_density:
step_calibration = Calibration_entering_density;
Podfunkciya_Number_4();

```

```

MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY =
MAX_NUMBER_SYMBOL_DENSITY_ARRAY;
current_position_array = MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY;
amount_incorporated_element_density =
Transformation_number_for_correct_image(DENSITY, amount_incorporated_element_density);
break;
case C_Save:
if(amount_incorporated_element_density != 0)
{
zero_byte = EEPROM_read_one_byte(0);
if(zero_byte == MAX_NUMBER_CALIBRATION_VALUE)
{
Conclusion_phrases(Error_write, 15, 0);
Delay(latency_5s);
key_jflag &= 0xF0; //All keys
Conclusion_phrases(Save, 9, (up_down_counter + 1));
}
else
{
step_calibration = Calibration_save;
step_save = displacement;
Preparation_for_scanning();
};
};
break;
default:
up_down_counter = 0;
break;
};
};
}
//Функция измерения
void Measurement_function(void)
if((key_flag & 0x01) == flag_S1)
{
key_flag &= 0xFE;
if(up_down_counter != 0)
{
up_down_counter--;
switch(up_down_counter)
{
case 0:
Conclusion_phrases(Vvod_temperatyri, 12, (up_down_counter + 1));
break;
case 1:
Conclusion_phrases(Tip_jidkosti, 12, (up_down_counter + 1));
break;
};
};
};
if((key_flag & 0x02) == flag_S2)

```

```

{
keyflag &= 0xFD;
if(up_down_counter < 2)
{
up_down_counter++;
switch(up_down_counter)
{
case 1:
Conclusion_phrases(Tip_jidkosti, 12, (up_down_counter + 1));
break;
case 2:
Conclusion_phrases(Pusk, 4, (up_down_counter + 1));
break;
};
};
};
if((key_flag & 0x04) == flag_S3)
{
key_flag &= 0xFB;
amount_incorporated_element_temperature = 0;
for(unsigned char N = 0; N <= MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY; N++)
{
TEMPERATURE[N] = 0;
};
mode = View_Menu;
Conclusion_phrases(Izmerenie, 9, (up_down_counter_main + 1));
};

if((key_flag & 0x08) == flag_S4)
{
key_flag &= 0xF7;
switch(up_down_counter)
{
case M_Entering_the_temperature:
step_measurement = Measurement_entering_temperature;
Podfunkciya_Number_4();
MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY =
MAX_NUMBER_SYMBOL_TEMPERATURE_ARRAY;
current_position_array = MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY;
amount_incorporated_element_temperature =
Transformation_number_for_correct_image(TEMPERATURE,
amount_incorporated_element_temperature);
break;
case M_Type_liquids:
step_measurement = Measurement_Type_liquids;
up_down_counter_type_liquids = 0;
Conclusion_phrases(Aviac_benzin, 12, 0);
if(up_down_counter_type_liquids == counter_Enter)
{
Enter_instruction(0xC7);
Enter_ANSII(0xC8);
};
};

```

```

break;
case M_Start:
step_measurement = Measurement_Start;
step_start = displacement;
Preparation_for_scanning();
break;
default:
up_down_counter = 0;
break;
};
};
}

```

//Функция ввода значения плотности
void Entering_to_density function(void)

```

{
if((key_flag & 0x01) == flag_S1)
{
key_flag &= 0xFE;
Press_Key_Up_Density()
};
if((key_flag & 0x02) == flag_S2)
{
key_flag &= 0xFD;
Press_Key_Down_Density();
};
if((key_flag & 0x08) == flag_S4)
{
key_flag &= 0xF7;
Press_Key_Enter();
};
if((key_flag & 0x10) == flag_S3_S1)
{
key flag &= 0xEF;
Press_Key_Mode_Up();
};
if((key_flag & 0x20) == flag_S3_S2)
{
key_flag &= 0xDF;
Press_Key_Mode_Down();
};

```

```

if((key_flag & 0x80) == flag_S3_S4)
{
key_flag &= 0x7F;

```

```

float density = unsigned_char_array_in_float(COMMON_ARRAY,
amount_incorporated_element_density, MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY);

```

```

if(((647 <= density) && (density <= 1000)) || (amount_incorporated_element_density == 0))
{
for(unsigned char N = 0; N <= MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY; N++)

```

```

{
DENSITY[N] = COMMON_ARRAY[N];
COMMON_ARRAY[N] = 0;
};
Podfunkciya_Number_5();
step_calibration = Calibration_Menu;
Conclusion_phrases(Vvod_plotnosti, 14, (up_down_counter + 1));
};
};
}

```

//Функция ввода значения температуры

void Entering_to_temperature_function(void)

```

{
if((key_flag & 0x01) == flag_S1)
{
key_flag &= 0xFE;
Press_Key_Up_Temperature();
};

if((key_flag & 0x02) == flag_S2)
{
key_flag &= 0xFD;
Press_Key_Down_Temperature();
};
if((key_flag & 0x08) == flag_S4)
{
key_flag &= 0xF7;
Press_Key_Enter();
};
if((key_flag & 0x10) == flag_S3_S1)
{
key_flag &= 0xEF;
Press_Key_Mode_Up();
};
if((key_flag & 0x20) == flag_S3_S2)
{
key_flag &= 0xDF;
Press_Key_Mode_Down();
};
if((key_flag & 0x80) == flag_S3_S4)
{
key_flag &= 0x7F;
float temperature = unsigned_char_array_in_float(COMMON_ARRAY,
amount_incorporated_element_temperature,
MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY);
if((( -45) <= temperature) && (temperature <= 100))
{
for(unsigned char N = 0; N <= MAX_NUMBER_SYMBOL_COMMON_ARRAY; N++)
{
TEMPERATURE[N] = COMMON_ARRAY[N];
COMMON_ARRAY[N] = 0;

```

```

};
Podfunkciya_Number_5();
step_measurement = Measurement_Menu;
Conclusion_phrases(Vvod_temperatyri, 12, (up_down_counter + 1));
};
};
}

```

//Регистрация перемещения поплавка

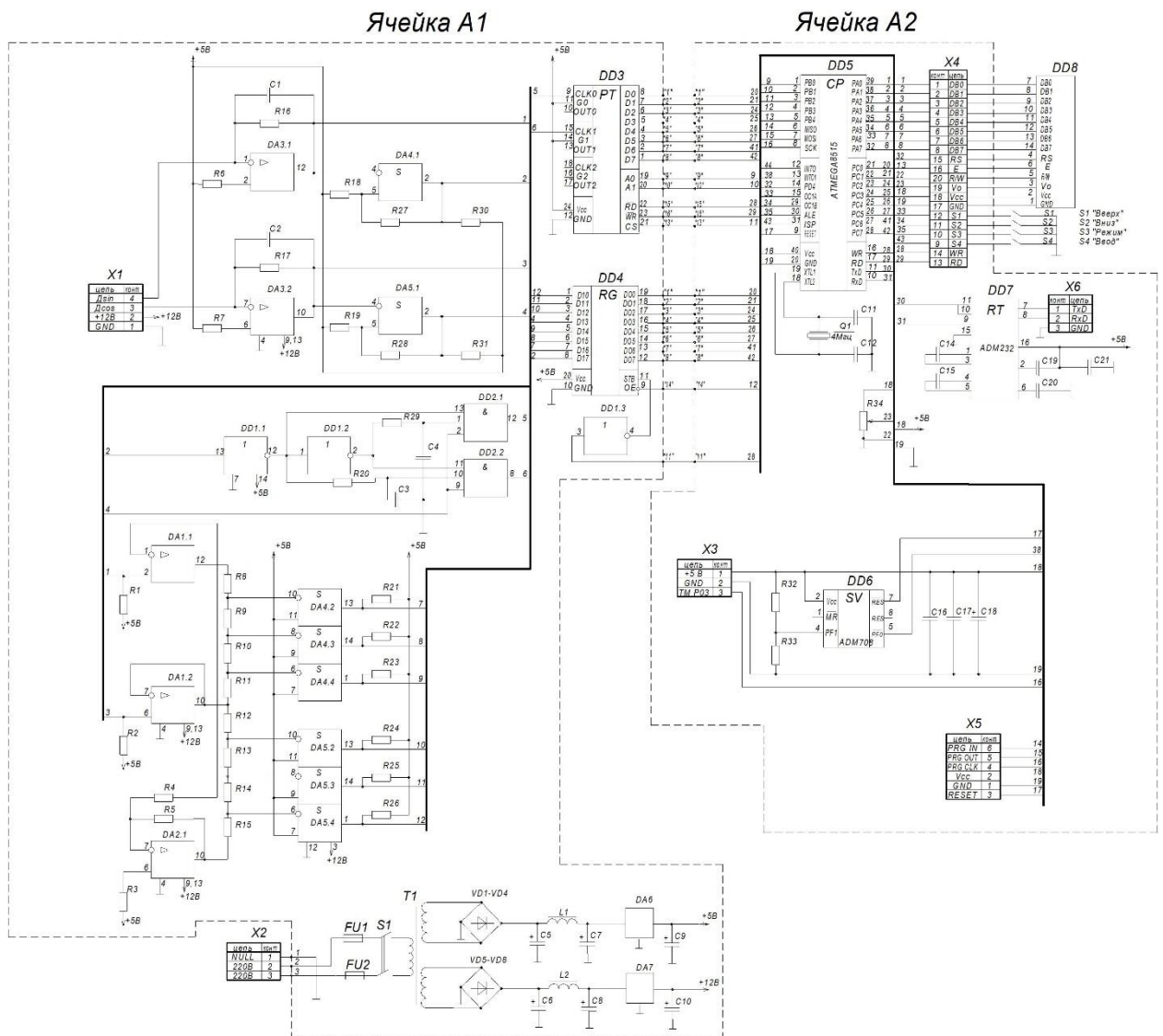
void Detecting_moving_bob(void)

```

{
if((medium_value_counter_0 != start_value_counter_0) || (medium_value_counter_1 !=
start_value_counter_1))
{
if(mode == Calibration)
{
step_save = S_Determination_L;
}
else
{
step_start = St_Density;
};
copy_moving_bob = 0;
correction_density = 0;
Enter_instruction(display_clear);
UNITS_MEASUREMENT(0);
flag_moving_bob = 0;
};
if((key_flag & 0x04) == flag_S3)
{
key_flag &= 0xF0; //All keys
if(mode == Calibration)
{
step_calibration = Calibration_Menu;
Conclusion_phrases(Save, 9, (up_down_counter + 1));
}
else
{
step_measurement = Measurement_Menu;
Conclusion_phrases(Pusk, 4, (up_down_counter + 1));
};
};
}
}

```

Схема электрическая принципиальная
«ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей»



**Документы, подтверждающие право на объекты интеллектуальной
собственности**

Данное приложение содержит копии следующих документов:

1. Оптоэлектронное устройство для измерения плотности жидкости с оптоволоконными линиями связи: пат. RU 206 142 U1. 2021106837/ В.Н. Астапов, Ю.В. Гашенко; заявл. 15.03.2021; опубл. 25.08.2021, Бюл. №24.

2. Устройство для измерения плотности жидкости с оптоволоконным преобразователем: пат. 196684 U1 Рос. Федерация. №2019136205/ Астапов В.Н, Гашенко Ю.В., Козлова И.Н.; заявл. 11.11.2019; опубл. 11.03.2020, Бюл. №8.

3. Программный комплекс для измерения плотности жидких сред: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662032 Российская Федерация: заявл. 29.05.2024 : опубл. 10.06.2024 / С. В. Сусарев, Ю. В. Гашенко.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 206142**Оптоэлектронное устройство для измерения плотности
жидкости с оптоволоконными линиями связи**Патентообладатель: *Астапов Владислав Николаевич (RU)*Авторы: *Астапов Владислав Николаевич (RU), Гашенко
Юлия Валерьевна (RU)*

Заявка № 2021106837

Приоритет полезной модели 15 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 25 августа 2021 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 15 марта 2031 г.Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 196684

**Устройство для измерения плотности жидкости с
оптоволоконным преобразователем**Патентообладатель: *Астапов Владислав Николаевич (RU)*Авторы: *Астапов Владислав Николаевич (RU), Гашенко Юлия
Валерьевна (RU), Козлова Ирина Николаевна (RU)*

Заявка № 2019136205

Приоритет полезной модели 11 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 марта 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 11 ноября 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иблиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024663715

Программный комплекс для измерения плотности
жидких сред

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
“Самарский государственный технический
университет” (RU)*

Авторы: *Сусарев Сергей Васильевич (RU), Гашенко Юлия
Валерьевна (RU)*



Заявка № 2024662032

Дата поступления 29 мая 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 июня 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe2853164baf96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Документы, подтверждающие внедрение материалов диссертационной работы

Данное приложение содержит копии следующих документов:

1. Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.
2. Акт о внедрении результатов диссертационного исследования ЗАО «ТМ-Сервис», г. Самара.
3. Акт об использовании результатов диссертационного исследования ООО «Метрология и Автоматизация», г. Самара.

Первый проректор - и.п.

AKT

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы старшего преподавателя Гашенко Ю.В., работающей на кафедре «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Автоматизация и управление технологическими процессами» для проведения лекций и лабораторных работ при подготовке студентов по направлениям подготовки:

по дисциплинам «Первичные измерительные преобразователи автоматизированных систем управления технологическими процессами», «Технические измерения, приборы и обработка информации»,

по дисциплине «Основы автоматизации технологических процессов нефтегазового производства».

Разработанная структура волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей, а также конструктивно-техническое решение датчика плотности пожароопасных жидкостей с волоконно-оптическим растровым преобразователем применяются в ходе подготовки выпускных квалификационных работ и курсовых проектов.

ИКИ 



Сусарев С.В.



АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Гашенко Юлии Валерьевны
«Волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения
плотности пожароопасных жидкостей»

Настоящим актом подтверждается, что материалы диссертационной работы Гашенко Юлии Валерьевны «Волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения плотности пожароопасных жидкостей» в настоящее время используется в работе ЗАО «ТМ-Сервис».

Внедрены конструктивно-техническое решение датчика плотности пожароопасных жидкостей с волоконно-оптическим растровым преобразователем и волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения плотности пожароопасных жидкостей на основе данного датчика.

Разработанный датчик и волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения плотности пожароопасных жидкостей соответствуют требованиям к метрологическим и эксплуатационным характеристикам датчиков и измерительных систем, применяемых в нефтегазовой отрасли.

Основные характеристики технологических процессов, в которых производился контроль плотности жидких сред:

Диапазон измеряемой плотности: 720...980 кг/м³;

Рабочий диапазон температур: 18...400°C;

Рабочее давление: до 0,07 МПа;

Рабочая среда: нефть, светлые жидкие нефтепродукты.

Во время эксплуатации на объектах нефтепереработки разработанной волоконно-оптической информационно-измерительной системы были получены следующие показатели: приведенная погрешность составила 0,3%, среднее быстродействие системы за период эксплуатации – 34 секунды, быстродействие уменьшалось по причине наличия волн во время операций слива/налива из-за увеличения времени стабилизации поплавка.

Результаты диссертационной работы способствуют решению актуальной задачи оперативного контроля плотности на объектах нефтепереработки в соответствии с требованиями к метрологическим и эксплуатационным характеристикам датчиков и систем, применяемых в нефтегазовой отрасли.

к.т.н., зам. директора ЗАО «ТМ-Сервис»
по техническим вопросам

А.Ю. Петров

к.т.н., начальник проектного отдела
ЗАО «ТМ-Сервис»

А.В. Тычинин

Общество с ограниченной ответственностью

МЕТРОЛОГИЯ и АВТОМАТИЗАЦИЯ

Поставка КИПиА, проектирование, изготовление и монтаж
автоматизированных систем учета энергоресурсов

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Гашенко Юлии Валерьевны «Волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения плотности пожароопасных жидкостей»

Настоящим актом подтверждается, что материалы диссертационной работы Гашенко Юлии Валерьевны «Волоконно-оптическая информационно-измерительная система для определения плотности пожароопасных жидкостей» используются Обществом с ограниченной ответственностью «Метрология и Автоматизация» по основным направлениям деятельности:

- перспективное проектирование;
- совершенствование техники и технологии сбора и хранения нефти;
- контроль качества нефти и нефтепродуктов;
- массовый учет нефти и нефтепродуктов;
- составление проектов строительства и реконструкции объектов и сооружений нефтегазоперерабатывающей промышленности;
- исследование нефти и нефтепродуктов.

В результате работы появилась возможность оперативного контроля процесса транспорта и переработки нефти и нефтепродуктов, брака продукции, качества сырья, промежуточных и конечных продуктов, а также их своевременного массового учета.

Генеральный директор

А.А. Масленников

Главный инженер

С.В. Дубов



15.06.2025г