

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 (технические науки)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САМАРА – 2025

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и управление технологическими процессами» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Астапов Владислав Николаевич

Официальные оппоненты: **Кузнецов Артём Анатольевич**,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический
университет имени А. Н. Туполева – КАИ»
(г. Казань), заведующий кафедрой
радиофотоники и микроволновых
технологий;

Воловач Владимир Иванович,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет сервиса» (г. Тольятти),
профессор Высшей школы передовых
производственных технологий

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С. П. Королева» (г. Самара)

Защита диссертации состоится 23 октября 2025 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте: https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/gashenko

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 учет. 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 трудоемким 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 удаленностью 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 исследования. 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 модерни-

зации 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 пожароопасных жидкостей 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 исследования – ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с применением поплавкового датчика плотности с волоконно-оптическим растровым преобразователем как элемента системы.

Предмет исследования – 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 (технические науки):

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

п. 2 – исследование и разработка структуры и технического решения ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей с применением поплавкового плотномера 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 следующем:

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. Предложены 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 позволяют 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 15 печатных работ, 4 из которых входят в журналы из перечня ВАК, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, определены цель и задачи исследования, описана практическая значимость диссертационной работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе обоснована необходимость разработки систем измерения плотности для искро-взрыво-пожароопасных жидкостей, а также приведен аналитический обзор существующих способов измерения плотности жидких сред, а именно поплавкового, весового, вибрационного, гидростатического, гидродинамического, вихревого, ультразвукового, радиоизотопного. Рассмотренные типы плотномеров подвержены влиянию агрессивных сред, требуют частого и сложного обслуживания, а их точность снижается из-за перепада температур, вязкости, неоднородности нефти, что усугубляется ограниченными условиями эксплуатации, сложностями монтажа и рисками безопасности.

Среди существующих типов плотномеров на объектах нефтегазового комплекса предпочтение отдается поплавковым плотномерам по причине простоты их эксплуатации и обслуживания, надежности и универсальности. Представлен анализ выпускаемых поплавковых плотномеров, в том числе в составе измерительных систем, рассмотрены особенности их применения. Сделан вывод, что представленные образцы громоздки и сложны в эксплуатации, имеют электрические элементы в зоне измерения, а также в большинстве случаев не отвечают требованиям технологических процессов нефтепереработки и их высокотемпературному характеру. Предложена возможность внедрения волоконно-оптических датчиков и информационно-измерительных систем для измерения плотности пожароопасных жидкостей, таких как нефть и продукты нефтепереработки.

Во второй главе рассмотрены вопросы математического обоснования физических процессов, происходящих в оптико-механической части измерительного преобразователя в составе предлагаемого поплавкового датчика плотности и ВОИИС.

Измерительный преобразователь, представленный на рисунке 1, состоит из полностью погруженного в жидкость поплавка, закрепленного на двух сильфонах сверху и снизу и соединенного со штоком-толкателем и растровой решеткой, а также двух пар подводящих и отводящих оптических волокон.

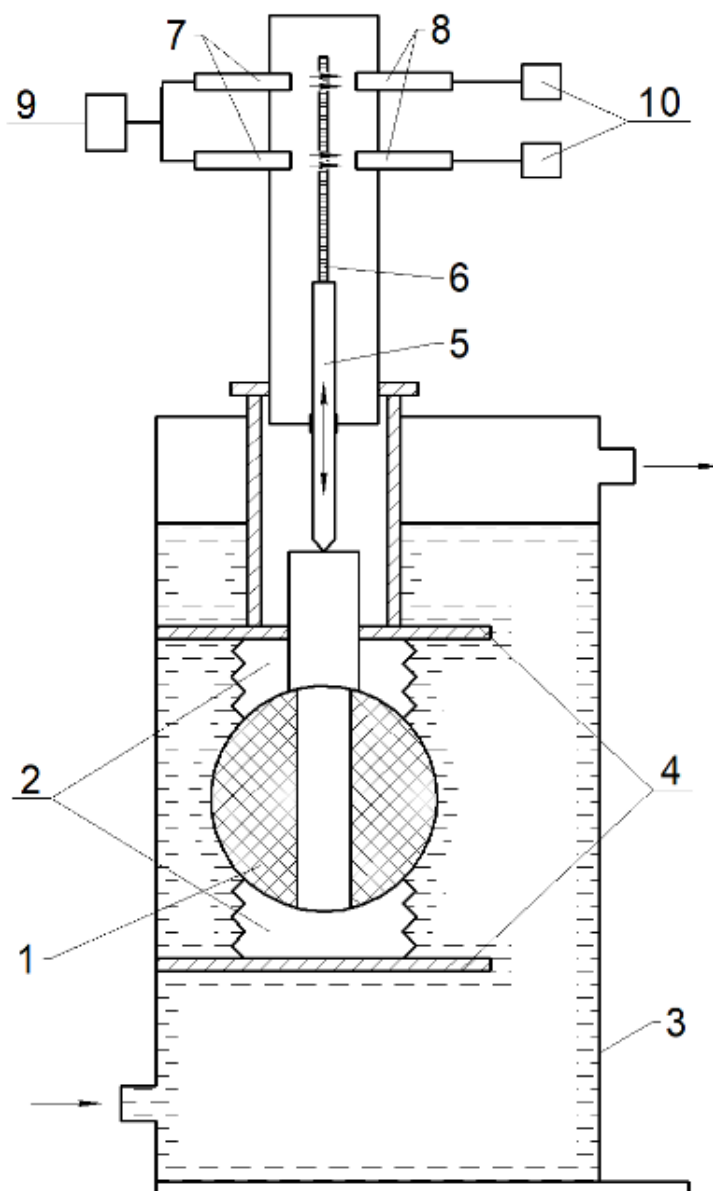


Рисунок 1 – Устройство измерительного преобразователя плотности:

- 1 – поплавок; 2 – сильфоны; 3 – емкость с анализируемой средой; 4 – кронштейны;
 5 – шток-толкатель; 6 – растровая решетка; 7 – подводящие оптические волокна;
 8 – отводящие оптические волокна; 9 – источник излучения;
 10 – приемники излучения

Для получения функциональной зависимости измеряемой плотности жидкой среды от перемещения поплавка были учтены силы, действующие на поплавок в состоянии равновесия, а также при перемещении пропорционально изменению плотности жидкой среды.

Получена функциональная зависимость плотности жидкости от перемещения поплавка:

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

где V – объем поплавка; $m_{\text{п}}$ – масса поплавка; $m_{\text{ст}}$ – масса стержня; x_0 – расстояние от положения равновесия поплавка до крайнего нижнего положения; x – перемещение поплавка относительно крайнего нижнего положения; k – жесткость сильфона; g – ускорение свободного падения.

Для простоты дальнейших преобразований и расчетов вводятся следующие обозначения.

$$\rho_{\min} = \frac{(m_{\text{п}} + m_{\text{ст}})}{V} - \frac{2k}{Vg} x_0 - \text{нижний предел измерения датчика, поплавок}$$

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.

$$K = \frac{2k}{Vg} - \text{коэффициент пропорциональности, позволяющий преобразо-}$$

вать 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.

Функциональная зависимость плотности жидкости от перемещения поплавка в упрощенном виде:

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

что позволяет судить о линейности функции преобразования.

Преобразователь перемещений поплавка состоит из двух пар подводящих и отводящих оптических волокон, а также растровой решетки с полосами равной ширины, попеременно затемняющими торцы отводящих оптических волокон (ООВ). Выявлено, что для оптоволоконного преобразователя плотности с открытым оптическим каналом целесообразно расположение растровой решетки и ООВ в пределах дистанции формирования светового пучка $x_{\text{кр}}$, т.е. в зоне наибольшей интенсивности излучения и резкого перепада сигнала, так как для дальнейшего преобразования необходимо только наличие либо отсутствие сигнала (светового потока) на отводящем торце.

На рисунке 2 показан случай пропускания светового потока через прозрачный участок решетки, где ПОВ – подводящее оптическое волокно; ООВ – отводящее оптическое волокно; d_c – диаметр сердцевины оптоволокон; d_o – диаметр отверстия диафрагмы; $x_{\text{кр}}$ – дистанция формирования светового пучка; s_k – толщина клеевого слоя; s_d – толщина диафрагмы; s_p – толщина растровой решетки; $x_{\text{ок}}$ – длина открытого оптического канала; x_1 – расстояние между диафрагмой и растровой решеткой; x_2 – расстояние между растровой решеткой и ООВ.

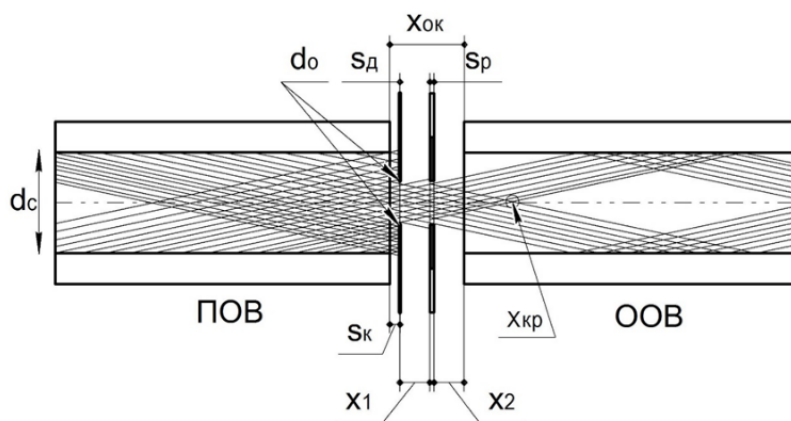


Рисунок 2 – Распределение светового потока в волоконно-оптическом растровом преобразователе перемещения (плотности)

Для модуляции светового потока на торце ПОВ используется диафрагма с круглым отверстием, что обеспечивает точность направленности светового потока, простоту преобразования и дальнейшего расчета. При прохождении оптического потока от излучающего торца ПОВ через диафрагму часть оптических лучей отсекается, а остальные попадают на растровую решетку, которая перемещается пропорционально плотности жидкости и имеет пропускающие и поглощающие инфракрасное излучение полосы равной ширины 8 мкм. При прохождении пропускающих зон растровой решетки световой поток поступает на ООВ.

Для оценки влияния дифракции при прохождении светового потока через круглое отверстие диафрагмы используется метод углового спектра с применением интеграла Рэлея–Зоммерфельда. Распределение электрического поля дифрагирующего света в точке (x, y, z) задается дифракционным уравнением

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

где $E(0, y_0, z_0)$ – начальное поле; i – мнимая единица; λ – длина волны; x – ось распространения световой волны; $\cos\theta = \frac{x}{r}$ – косинус угла между x и r ;

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

Произведенный расчет для рабочей длины волны $\lambda = 850\text{--}900$ нм, а также результаты моделирования показали, что для фокального пятна диаметром не более 8 мкм (т.е. не превышающим ширину зоны пропускания или поглощения растровой решетки) растровая решетка должна располагаться на расстоянии не более 60 мкм от диафрагмы во избежание увеличения диаметра фокального пятна и ложного срабатывания счетчиков при наличии светового потока более чем в одной пропускающей зоне растровой решетки, что приведет к неточности при дальнейшем расчете ее перемещения. Оптимальное расстоя-

ние для расположения растровой решетки и торца ООВ составляет 30–80 мкм от диафрагмы. При прохождении световым потоком растровой решетки на торце ООВ не наблюдается периодических полос, четких минимумов и максимумов, а есть только центральное пятно с размытыми границами. Это объясняется малыми расстояниями между элементами оптического канала.

В третьей главе разработаны структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей и алгоритм ее функционирования.

Структура ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей, представленная на рисунке 3, включает в себя источник излучения ИИ, две пары подводящих (ПОВ1, ПОВ2) и отводящих (ООВ1, ООВ2) оптических волокон, два приемника излучения (ПИ1, ПИ2), измерительный преобразователь, устройство обработки сигналов (УОС), информация с которого поступает на устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ), устройство ввода и отображения информации.

Разрабатываемая ВОИИС имеет два измерительных канала, которые представляют собой две пары ПОВ–ООВ. При прохождении излучения от ПОВ через прозрачные участки растровой решетки на выходе приемников излучения формируются электрические импульсные сигналы в виде периода синусоиды.

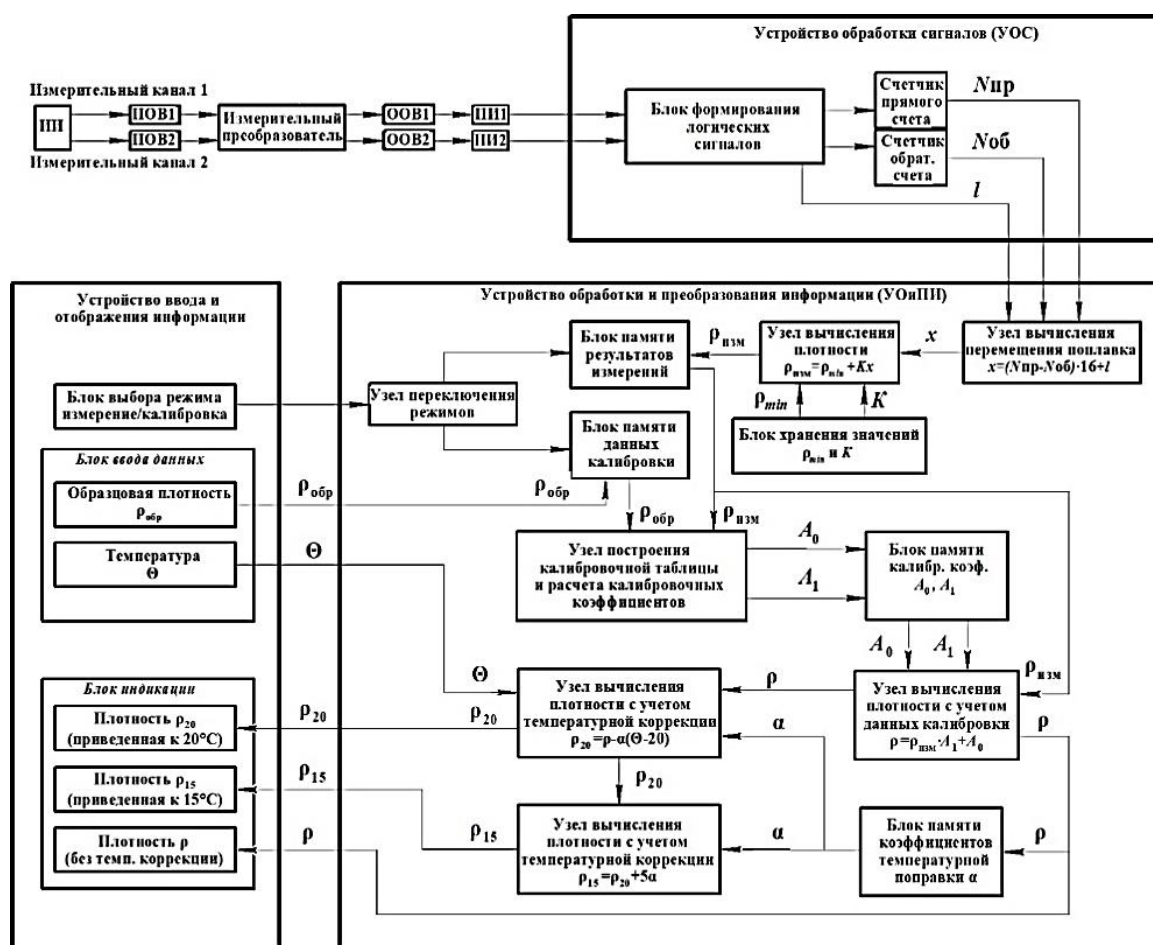


Рисунок 3 – Структура волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей

Два измерительных канала предусмотрены для того, чтобы обеспечить корректный счет импульсов как при прямом, так и при обратном ходе растровой решетки и избежать ложного счета, когда количество импульсов при обратном ходе растровой решетки считывается счетчиком как количество импульсов прямого хода, т.е. возникает неточность определения значения перемещения растровой решетки. Для этого сигналы первого и второго измерительных каналов смещены относительно друг друга на 90° , что упрощает дальнейшее амплитудно-логическое преобразование сигналов и позволяет корректно определить количество импульсов в зависимости от направления хода растровой решетки и значение ее перемещения.

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, выходными сигналами счетчиков является количество импульсов прямого и обратного счета $N_{пр}$ и $N_{об}$ соответственно. Выходным сигналом электронного нониуса l является код, для каждого значения которого соответственно определяется значение перемещения поплавка в микрометрах. 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 расчета 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 для различных поддиапазонов измеряемой плотности.

Устройство обработки и преобразования информации (УОиПИ) соединено тремя входами с устройством обработки сигналов (УОС), а также тремя входами и тремя выходами с устройством ввода и отображения информации. УОиПИ позволяет определить плотность анализируемой жидкости с учетом данных калибровки, а также плотность, приведенную к стандартным условиям, т.е. к 15 и 20 °С с учетом коэффициентов температурной поправки в соответствии с измеренной плотностью. Результаты измерения выводятся на блок индикации, который является частью устройства ввода и отображения инфор-

мации. В данное устройство помимо блока индикации также входят блок ввода данных (показаний, полученных с образцового плотномера, температуры анализируемой жидкости) и блок выбора режима работы (измерение или калибровка). Устройство ввода и отображения информации имеет три выхода и три входа, которыми оно соединено с УОиПИ.

На рисунке 4 представлена блок-схема разработанного алгоритма работы ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей в режиме калибровки.

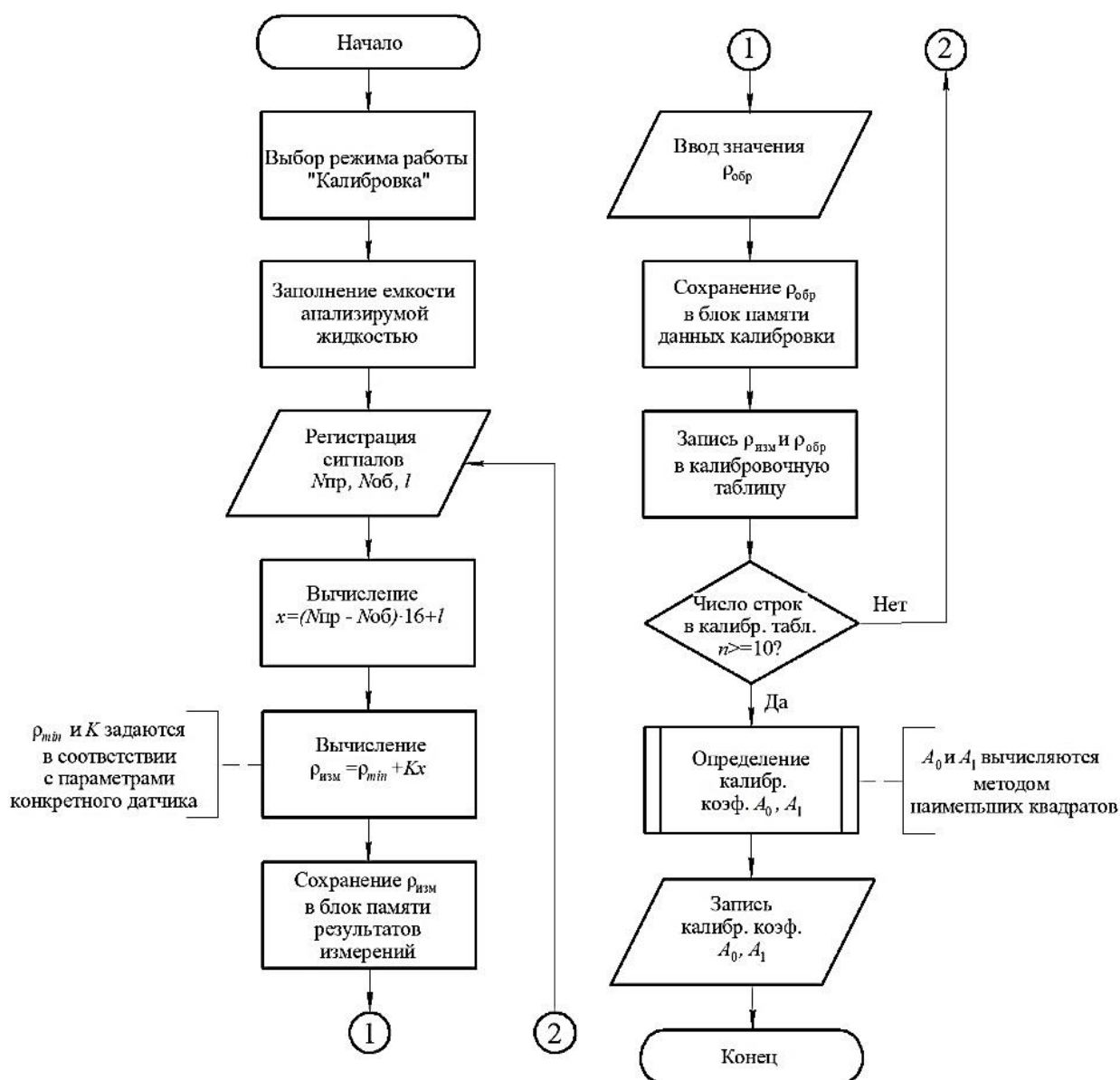


Рисунок 4 – Алгоритм работы волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей в режиме калибровки

При выборе режима калибровки вводится значение образцовой плотности $\rho_{обр}$, полученное с помощью образцового лабораторного плотномера вибрационного типа ВИП-2МР. После заполнения емкости анализируемой жид-

костью происходит перемещение поплавка и, соответственно, растровой решетки пропорционально плотности жидкости; на выходе устройства обработки сигналов формируются сигналы $N_{пр}$, $N_{об}$ – количество импульсов счетчиков прямого и обратного счета соответственно, l – значения электронного нониуса, которые принимаются и регистрируются блоком обработки и преобразования информации.

Производится вычисление перемещения поплавка:

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

и предварительного значения плотности анализируемой жидкой среды:

$$\rho_{изм} = \rho_{min} + Kx.$$

При выборе режима калибровки производится запись значений измеренной плотности $\rho_{изм}$ и значений образцового плотнмера $\rho_{обр}$ в калибровочную таблицу. На основе данных калибровочной таблицы с применением метода наименьших квадратов определяется интерполяционный полином первой степени вида

$$y = A_1 x + A_0,$$

график которого представлен на рисунке 5, где по оси X отложены значения плотности $\rho_{изм}$, полученные с помощью калибруемого плотнмера в составе разработанной ИИС, а по оси Y – значения плотности $\rho_{обр}$, полученные с образцового лабораторного вибрационного плотнмера. Согласно данному полиному определяются коэффициенты A_1 и A_0 , называемые калибровочными.

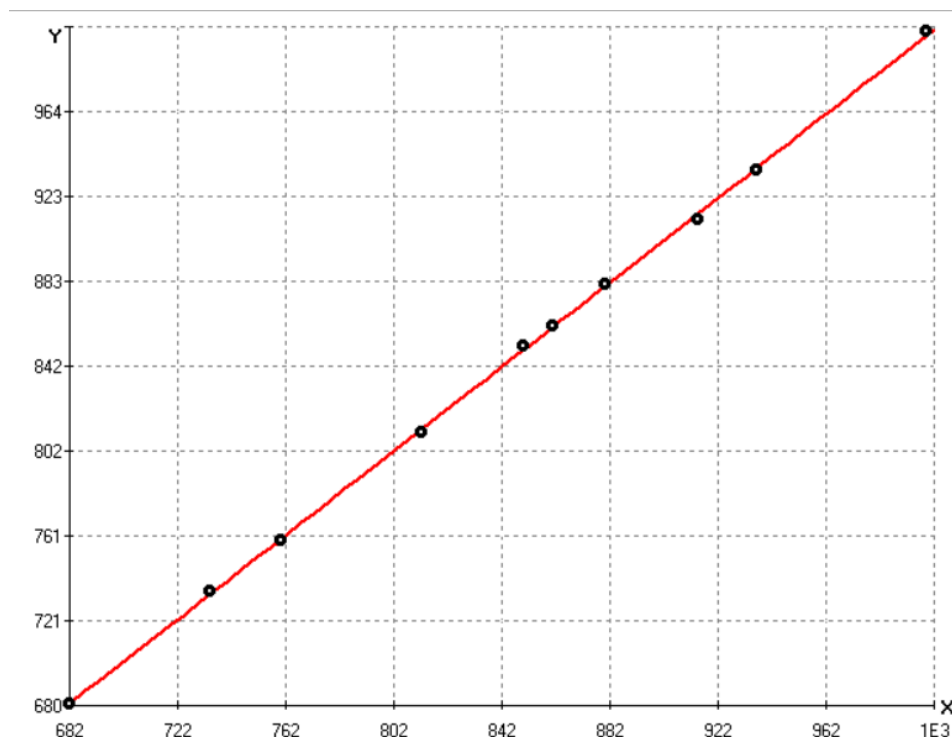


Рисунок 5 – Интерполяционный полином по результатам калибровки

Полученные калибровочные коэффициенты A_1 и A_0 записываются в блок памяти калибровочных коэффициентов. Калибровка завершена, когда количество проведенных итераций составляет 10 и более, определены интерполяционный полином и, соответственно, калибровочные коэффициенты.

Блок-схема разработанного алгоритма работы ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей в режиме измерения представлена на рисунке 6.

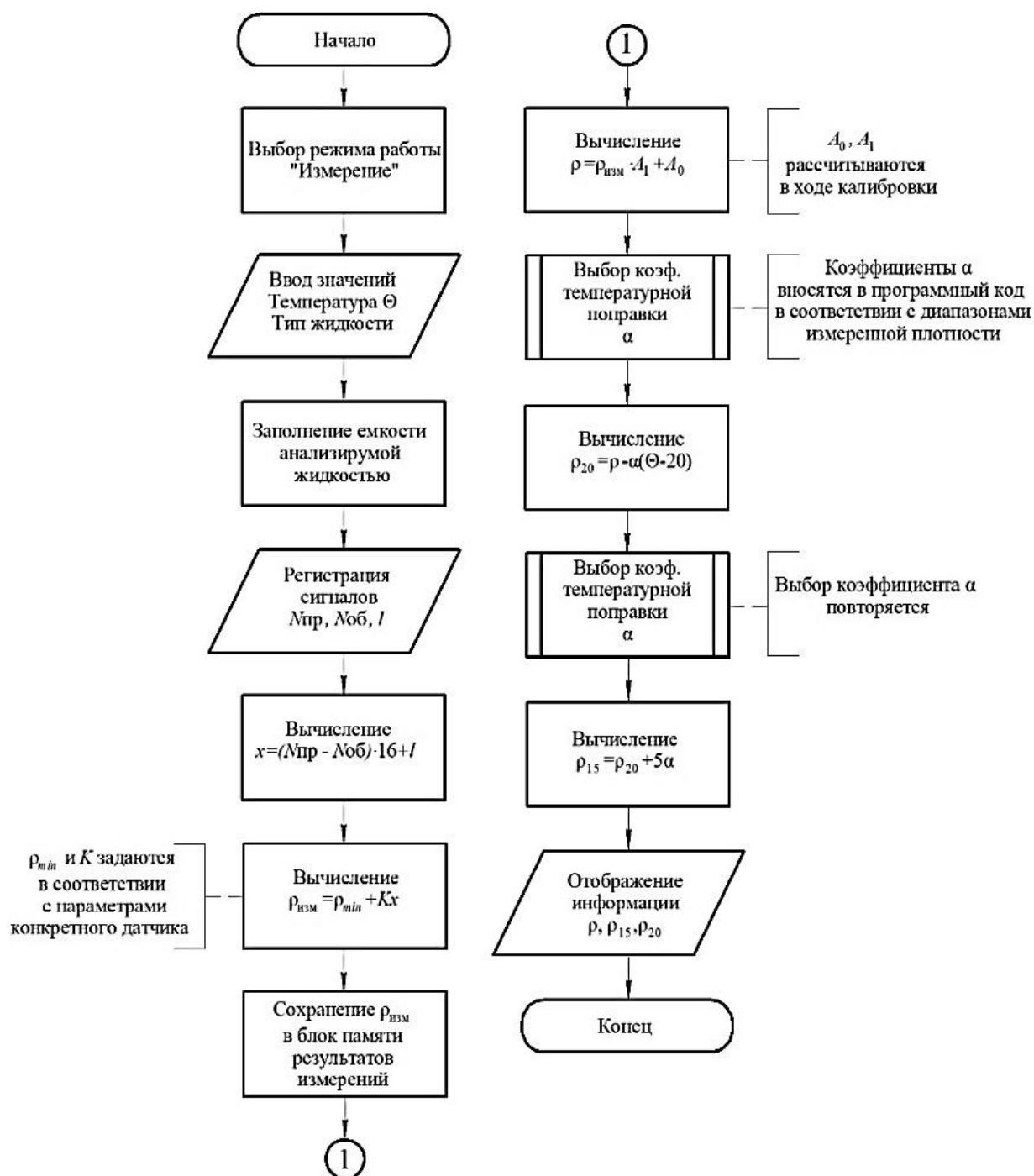


Рисунок 6 – Алгоритм работы волоконно-оптической информационно-измерительной системы для определения плотности пожароопасных жидкостей в режиме измерения

Измеренная плотность с учетом данных калибровки (рассчитанных калибровочных коэффициентов) в режиме измерения определяется как

$$\rho = \rho_{\text{изм}} A_1 + A_0 = (\rho_{\text{min}} + Kx) A_1 + A_0.$$

Для приведения полученного значения плотности к стандартным условиям, т.е. для обеспечения температурной поправки результатов измерения, в программном коде поддиапазонам измеряемой плотности присваивается коэффициент температурной поправки α , значения которого определяются на основе справочных данных. С учетом введенной температуры анализируемой жидкости рассчитываются показатели плотности ρ_{15} и ρ_{20} , приведенные к стандартным условиям при $\Theta = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно:

$$\rho_{20} = \rho + \alpha(\Theta - 20);$$

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

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

Четвертая глава посвящена анализу, реализации и экспериментальному исследованию ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей.

Для оценки работоспособности ВОИИС был проведен энергетический расчет оптических каналов измерительной системы, основанный на оценке потерь в оптическом канале, вносимых элементами ВОИИС. Суммарные оптические потери на один измерительный канал составили $\eta_{\Sigma} = 33\text{--}43\text{ дБ}$, что не превышает максимальную чувствительность применяемых фотоприемников. Мощность в зоне измерения много меньше допустимых безопасных значений мощности оптического излучения для оборудования, применяемого во взрывоопасных средах, равной 35 мВт, что обеспечивает искро-взрывопожаробезопасность разрабатываемой ВОИИС.

Проведенный метрологический анализ ВОИИС для определения плотности жидких сред позволяет учесть основные источники погрешности. Приведены решения, благодаря которым представленные составляющие погрешности могут быть снижены либо сведены к нулю.

Описана методика проведения калибровки средства измерения в лабораторных условиях, а также получены результаты проведенных экспериментальных исследований ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей при различных температурах анализируемой среды. В качестве анализируемых сред использовались дистиллированная вода, моторное масло, мазут, сырая нефть, дизельное топливо, керосин, этиловый спирт, бензин АИ-92 и АИ-95, нефтяной растворитель. Результаты проведенных испытаний при $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты лабораторных испытаний системы при температуре жидкой среды $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наименование жидкости	Значение плотности, полученное с образцового датчика, кг/м^3	Номер эксперимента				
		1	2	3	4	5
1. Вода	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	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

Проведенные лабораторные исследования подтверждают работоспособность данной ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей и поплавкового датчика плотности в ее составе, а также предложенного алгоритма функционирования ВОИИС в режимах калибровки и измерения. Для рассматриваемого экспериментального образца ВОИИС основная погрешность, т.е. погрешность при нормальных условиях, за которые была принята температура анализируемой жидкости $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляет $\Delta_{\text{осн}} = \pm 0,9\text{ кг/м}^3$ или $\gamma_{\text{осн}} = \pm 0,26\text{ \%}$. Дополнительная температурная погрешность для температуры анализируемой среды $40\text{ }^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $\gamma_{\text{доп}} = \pm 0,0012\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. 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 $\Theta = 20 \dots 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, составила $\Delta = \pm 1,1\text{ кг/м}^3$, а приведенная погрешность $\gamma = \pm 0,4\text{ \%}$. Приведенная погрешность выпускаемых промышленных поплавковых плотномеров непрерывных измерений, используемых как отдельно, так и в составе различных ИИС, колеблется от $\pm 0,5$ до $\pm 2\text{ \%}$. Диапазон рабочих температур поплавкового датчика в составе ВОИИС (минус $50 \dots 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) соответствует условиям большинства технологических процессов хранения и переработки нефти. Полученные результаты работы ВОИИС доказывают ее точность и возможность применения для непрерывного контроля плотности жидких пожароопасных сред на объектах нефтегазового комплекса при высокотемпературных режимах работы, а также подтверждают ее искро-взрывопожаробезопасность.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

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 поплавок, 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 °С), 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 $\Theta = 20 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $40 \text{ }^\circ\text{C} < \Theta \leq 90 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $\gamma_{\text{доп}} = \pm 0,0012 \text{ } \%/^\circ\text{C}$. Произведены реализация разработанной ВОИИС для определения плотности пожароопасных жидкостей и ее внедрение.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК
при Минобрнауки России*

1. 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.

2. **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.

3. **Гашенко, Ю. В.** Особенности распределения светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя плотности жидких сред с открытым оптическим каналом / **Ю. В. Гашенко**, А. А. Гашенко, Д. А. Мельникова, В. Н. Астапов // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 62–64.

4. **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.

5. **Гашенко, Ю. В.** Аналитический обзор и исследование устройств и методов измерения плотности жидкости / **Ю. В. Гашенко** // Научное обозрение. Технические науки. – 2019. – № 6 – С. 21–27.

6. **Гашенко, Ю. В.** Применение оптоволоконных систем для измерения плотности жидких сред в нефтегазовом комплексе / **Ю. В. Гашенко** // Научные исследования и разработки: новое и актуальное : материалы X Международной научно-практической конференции (г. Ростов-на-Дону, 26 мая 2021 г.). – Ростов-на-Дону : Издательство Южного университета ИУБиП, 2021. – С. 146–151.

7. **Гашенко, Ю. В.** Безопасное измерение плотности пожароопасных жидкостей в нефтегазовой промышленности с применением волоконно-оптических систем / **Ю. В. Гашенко** // Актуальные вопросы обеспечения безопасности жизнедеятельности : межвузовский сборник научных трудов. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2021. – С. 13–16.

8. **Гашенко, Ю. В.** Особенности применения поплавкового метода измерения плотности пожароопасных жидкостей / **Ю. В. Гашенко** // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сборник научных статей Международной научной конференции (г. Казань, 30–31 января 2022 г.). – Казань : Конверт, 2022. – С. 31–34.

9. **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 : сборник статей LXIII Международной научно-практической конференции (г. Москва, 15 сентября 2024 г.). – Москва : Актуальность.РФ, 2024. – С. 22–26.

10. **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 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (г. Бийск, 30 октября – 1 ноября 2024 г.) / Алтайский государственный технический университет, БТИ. – Бийск : Издательство Алтайского государственного технического университета, 2024. – С. 62–64.

11. **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.

12. **Гашенко, Ю. В.** Разработка физического принципа непрерывного измерения плотности жидких сред на базе оптико-механического преобразователя перемещений / **Ю. В. Гашенко** // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований : сборник статей по материалам LXXXII Международной научно-практической конференции. – Вып. 12 (73). – Новосибирск : СибАК, 2024. – С. 72–78.

Объекты интеллектуальной собственности

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

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

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

Научное издание

ГАШЕНКО Юлия Валерьевна

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

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные
и управляющие системы (технические науки)

Редактор *Е. П. Мухина*

Технический редактор *Ю. В. Анурова*

Компьютерная верстка *Ю. В. Ануровой*

Подписано в печать 03.07.2025. Формат 60×84¹/₁₆.

Усл. печ. л. 1,16. Заказ № 292. Тираж 100.

Издательство ПГУ.

440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

Тел./факс: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru