

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт Машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Управление промышленной и экологической безопасностью»

(наименование кафедры)

20.04.01 Техносферная безопасность

(код и наименование направления подготовки)

Системы управления производственной, промышленной и экологической
безопасностью

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Совершенствование методов управления промышленной
безопасностью на магистральных нефтепроводах (на примере участка
трубопровода «Грушовая-Шесхарис» ПАО «Черномортранснефть»)

Студент	<u>П.Г. Ткаченко</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Научный руководитель	<u>И.И. Рашоян</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)
Консультант	<u>А.Г. Егоров</u> (И.О. Фамилия)	_____ (личная подпись)

Руководитель программы д.п.н., профессор Л.Н.Горина _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« ___ » _____ 2018г.

Допустить к защите
Заведующий кафедрой д.п.н., профессор Л.Н.Горина _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« ___ » _____ 20___ г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ	12
1.1 Определение и классификация магистральных нефтепроводов.....	12
1.2 Основные объекты и сооружения магистральных нефтепроводов	14
1.3 Промышленная безопасность магистральных нефтепроводов.....	17
1.4 Анализ существующих методов обнаружения утечек нефти	21
1.5 Характеристика места проведения исследования	29
1.6 Информационно-патентный поиск систем обнаружения утечек нефти.....	30
1.7 Постановка цели и задач диссертационного исследования	34
1.8 Выводы по первому разделу	37
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ ИЗ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА.....	38
2.1 Оптимальный процесс обработки данных об обнаружении утечек нефти.....	38
2.2 Исследование алгоритмов обработки данных от датчиков избыточного давления.....	41
2.3 Применение метаэвристических поведенческих алгоритмов.....	44
2.3.1 Описание классического алгоритма оптимизации роением частиц.....	44
2.3.2 Выбор топологии связей роя частиц	48
2.4 Применение самоорганизующихся карт Кохонена	52
2.5 Выводы по второму разделу	63
3 ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ	65
3.1 Создание новой модели нейронной сети Кохонена	65
3.2 Анализ полученных результатов применения новой модели	71
3.3 Модернизация существующей сети связи магистрального нефтепровода...	72
3.4 Расчет основных характеристик новой сети связи	83

3.5 Выбор оборудования для организации системы обнаружения утечек нефти.....	86
3.6 Разработка алгоритма обработки данных системы обнаружения утечек нефти.....	89
3.7 Аспекты промышленной безопасности, охраны труда и практического применения исследуемой СОУ	95
3.8 Анализ влияния нового метода контроля утечки на повышение уровня промышленной безопасности объекта.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сегодня трудно представить развитие современного общества без открытия нефтяных и газовых месторождений, разработки способов транспортировки данных продуктов, их переработки и всестороннего использования данных продуктов в различных отраслях.

Россия обладает уникальной трубопроводной системой, лидирующей по грузообороту, производительности и себестоимости перекачки сырья среди других видов транспорта. Текущее состояние нефтепроводов нашей страны плачевное, у более половины срок эксплуатации превышает 25-летний срок. Общая проблема функционирования трубопроводной системы осложняется тем, что существующая противопожарная техника и технологии не могут надежно обеспечивать безопасность, что подтверждается ростом количества возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами на объектах. . Поэтому на сегодняшний день активно происходит поиск научно-технических решений по моделированию прикладных систем управления техносферной безопасностью магистральных трубопроводов для решения триединой цели: гарантирование экологической безопасности, предотвращение человеческий жертв вследствие чрезвычайных ситуаций и предупреждение возникновения ЧС. Особую актуальность проблеме идентификации утечек нефти придает ужесточение природоохранных законов. Таким образом, актуальность настоящего диссертационного исследования заключается в повышении уровня промышленной безопасности на магистральных нефтепроводах.

Существующие системы управления работой магистральных нефтепроводов требуют пересмотра и модернизации с точки зрения автоматизации, внедрения инновационных технологий и компьютерных систем. Описываемый в работе метод обнаружения утечек является наиболее перспективным как для модернизации системы обнаружения утечек, так и для системы управления безопасностью нефтепровода в целом.

Исследуемая в работе система обнаружения утечек основана на работе микроскопических роботов, которые передвигаются по трубопроводу вместе с нефтепродуктом. Корректная работа микроскопических роботов требует внимательного подхода к разработке алгоритмов их управления.

Для решения задачи алгоритмического обеспечения процесса управления системы обнаружения утечек нефти предлагается применять получившие в последнее десятилетие широкое распространение практические аспекты нейронных сетей, в силу своей гибкости, оптимальности и универсальности. Однако для формирования автоматизированной системы гарантирования техносферной безопасности на объектах магистрального трубопровода данная технология используется впервые. В основу разработки положена теория нейронных сетей, которая является бионической технологией, основанной на существующих алгоритмах поведения роящихся насекомых, косяков рыб и т.д.

Для формирования системы приема-передачи сигнала в нейронную сеть предлагается встроить технологию по алгоритму Кохонена. Данный алгоритм был сформирован в попытке сформировать для решения практических задач систему обучения, которая могла бы накапливать значительный объем упорядоченных данных, получаемых из слоистой нейронной сети. Успешная реализация концепции была осуществлена финским профессором Тейво Кохонен в 1982 году и алгоритм был назван его именем – самоорганизующиеся карты Кохонена (СОКК). СОКК можно обучить узнавать или находить взаимосвязи между входами и выходами.

Целью диссертационного исследования является повышение уровня промышленной безопасности на магистральных нефтепроводах путем совершенствования метода управления параметрами системы обнаружения утечек нефти.

Чтобы достигнуть установленной цели в данной работе нужно найти решение для таких задач:

– рассмотреть классификацию, основные объекты и сооружения магистральных нефтепроводов;

- рассмотреть систему управления промышленной безопасностью магистральных нефтепроводов;
- провести анализ существующих методов обнаружения утечек нефти;
- выполнить анализ существующих моделей и алгоритмов оптимизации;
- охарактеризовать оптимальный процесс обработки данных об обнаружении утечек нефти;
- выбрать оптимальную модель и провести анализ результатов применения новой модели;
- выбрать оборудование для организации системы обнаружения утечек нефти;
- оценить влияние нового метода контроля утечек на уровень промышленной безопасности.

Объектом исследования является система обнаружения утечек нефти.

Теоретическая и методологическая база исследования основана на изучении, систематизации и анализе научной литературы по исследуемой теме; изучении и обобщении опыта моделирования технических систем; анализе нормативной документации.

Научная новизна исследования:

– В ходе анализа технического состояния современных отечественных нефте- и нефтепродуктопроводов выявлена проблема возникновения утечек, угроза которых определена в действующих нормативах по обеспечению техносферной безопасности. Сформулированы основные причины, способствующие нарушению целостности трубопроводов, а также определены главные требования, предъявляемые к системам диагностики утечек.

– Рассмотрена классификация, основные объекты и сооружения магистральных нефтепроводов и определены ключевые параметры системы. На базе российских и международных стандартов выделен подход к определению нефтепровода как объекта безопасности.

– Рассмотрена система управления промышленной безопасностью магистральных нефтепроводов на основе анализа патентной информации и определены пробелы в системе проектирования систем сбора данных.

– Проведен анализ существующих методов обнаружения утечек нефти и сформирован подход к их классификации. В работе показаны преимущества и недостатки физических методов и выявлены перспективы использования интеллектуальных систем.

– Выполнен анализ существующих моделей и алгоритмов оптимизации система сбора данных для определения утечек в магистральных трубопроводах на основе анализа действующей системы и ресурсов площадки «Грушовая» в АО «Черномортранснефть» с участком трубопровода Грушовая-Шесхарис.

– Охарактеризован оптимальный процесс обработки данных об обнаружении утечек нефти и построена модель математической логики для формирования самообучающейся системы.

– Выбрана оптимальная модель формирования нейронной сети и проведен анализ результатов применения новой модели; в совокупности с разработанным способом расчета местоположения утечки система автоматического определения утечек представляет законченную модель для автоматического определения утечки и расчета ее местоположения.

– Разработана схема выявления потерь количества нефти на магистральных трубопроводах, основанная на работе роя микроскопических частиц-роботов, которые двигаются по нефтепроводу вместе с нефтепродуктом.

– Выбрано оборудование для организации системы обнаружения утечек нефти и показана специфика организации охраны труда и промышленной безопасности сформированной системы.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что применение искусственных нейронных сетей при относительно низких затратах позволяет повысить точность определения места не только утечки, но и других внештатных ситуаций; обеспечить постоянный мониторинг состояния нефтепровода; позволяет обеспечить наивысшее качество управления

нефтепроводом, доступное на сегодняшний день. Повышение точности расчёта местоположения утечки приведет к уменьшению потерь нефтепродуктов, а также сократит ущерб на окружающую среду. На основе сопоставления действующих нормативов по обеспечению безопасности магистральных трубопроводов определена и математически описана угроза утечек. Благодаря этому сформирован алгоритм управления предлагаемой системой обнаружения утечек в магистральных нефтепроводах

Положения, выносимые на защиту:

– Анализ основных причин, способствующих нарушению целостности трубопроводов, а также анализ требований, предъявляемых к системам диагностики утечек.

– Анализ существующих методов обнаружения утечек нефти и подход к их классификации.

– Анализ преимуществ и недостатков физических методов и перспектив использования интеллектуальных систем.

– Анализ существующих моделей и алгоритмов оптимизации система сбора данных для определения утечек в магистральных трубопроводах на основе анализа действующей системы и ресурсов площадки «Грушовая» в АО «Черномортранснефть» с участком трубопровода Грушовая-Шесхарис.

– Оптимальный процесс обработки данных об обнаружении утечек нефти и математическая модель для формирования самообучающейся системы.

– Оптимальная модель формирования нейронной сети и анализ результатов применения новой модели в совокупности с разработанным способом автоматического определения утечки и расчета ее местоположения.

– Выбор оборудования для организации системы обнаружения утечек нефти и показана специфика организации охраны труда и промышленной безопасности сформированной системы.

– Анализ влияния нового метода контроля утечки на повышения уровня промышленной безопасности нефтепровода.

Степень достоверности и апробация результатов: результаты работы прошли апробацию на следующих научно-практических конференциях:

– «Риск-ориентированный подход в деятельности Ростехнадзора», Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности 13 декабря 2017 г., Москва;

– VII Международная научно-техническая конференция и выставка «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», которая состоялась 6 - 27 октября 2017 г. в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка;

– Пятая Международная конференция «Экологическая безопасность в газовой промышленности» (ESGI–2017), состоявшаяся 5-7 декабря 2017 года, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

– «Разработка алгоритма математической модели системы обнаружения утечек нефти», принято к опубликованию в журнале «Инновации и инвестиции» №3 за 2018 год;

– «Анализ эффективности некоторых модификаций классического роя частиц», опубликованная в журнале Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки» №11, 2017.

Структура диссертации. Диссертация состоит из определений, обозначений и сокращений, введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников и 2 приложений. Основная часть исследования изложена на 108 страницах, текст иллюстрирован 42 рисунками и содержит 3 таблицы.

В настоящей магистерской диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

1. Авария на объекте магистрального трубопровода – внезапный вылив или истечение опасной жидкости в результате полного или частичного разрушения трубопровода, сопровождаемое одним или несколькими из следующих событий: смертельное травмирование; травмирование с потерей

трудоспособности; воспламенение опасной жидкости или взрыв её паров; загрязнение любого водостока реки, озера, водохранилища поверх установленных пределов; утечкой более 2м³ в сутки.

2. Граничный эффект – негативный эффект при использовании самоорганизующихся карт Кохонена, который заключается в том, что нейроны на внешней части решетки имеют меньшее количество соседей, часто захватываясь «внутренними» нейронами, что приводит к искажению изображения, которое «сминается к центру».

3. Искусственный интеллект – наука и технология создания интеллектуальных машин, особенно интеллектуальных компьютерных программ.

4. Кластерный анализ – многоуровневая статистическая задача, которая выполняет сбор информации об анализируемых объектах, а затем выполняющая организацию подобных объектов в группы.

5. Контроль технического состояния – инспекция состояния и параметров оборудования и сооружений на предмет их соответствия требованиям технических условий и технической документации.

6. Магистральный трубопровод (для транспортировки нефти и нефтепродуктов) - это «единый производственно-технологический комплекс, предназначенный для транспортировки подготовленной нефти и нефтепродуктов от пунктов приема до пунктов сдачи потребителям или перевалки их на автомобильный, железнодорожный или водный виды транспорта, состоящий из конструктивно и технологически взаимосвязанных объектов, включая сооружения издания, используемые для целей обслуживания и управления объектами магистрального трубопровода» [6].

7. Самоорганизующаяся карта Кохонена – нейронная сеть с обучением без учителя, выполняющая задачу визуализации и кластеризации.

В настоящей магистерской диссертации применяют следующие обозначения и сокращения:

1. АОКС (модуль) аналоговой коррекции сигнала;
2. ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;
3. ВОД – волоконно-оптический датчик;

4. ВОСК – волоконно-оптический сенсорный кабель;
5. ГПС – головная перекачивающая станция;
6. ДД – датчик давления;
7. КИП – контрольно-измерительный прибор;
8. ЛЧ – линейная часть;
9. МН – магистральный нефтепровод;
- 10.НБ – нефтебаза;
- 11.НС – нейронная сеть;
- 12.ОЛТ – окончание линейного тракта
- 13.ППС – промежуточная перекачивающая станция;
- 14.РД – руководящий документ;
- 15.САМПО – система автоматического мониторинга протяжённого объекта;
- 16.СДКУ – система диспетчерского контроля и управления;
- 17.СОД – средства очистки и диагностики;
- 18.СОКК – самоорганизующиеся карты Кохонена;
- 19.СОУ – система обнаружения утечек;
- 20.ТАУ – теория автоматического управления;
- 21.CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing грубое спектральное уплотнение каналов;
- 22.WDM – wavelength division multiplexing – спектральное уплотнение каналов.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДАХ

1.1 Определение и классификация магистральных нефтепроводов

В общем случае, «нефтепроводом принято называть трубопровод, предназначенный для транспорта нефти и нефтепродуктов» [1]. На рисунке 1.1 показано, что по своему назначению нефтепроводы подразделяются на три группы:



Рисунок 1.1 – Группы нефтепроводов [1-3]

Магистральные нефтепроводы используются для переброски значительных объёмов нефти и нефтепродуктов на большие расстояния (до нескольких тысяч километров), используемое давление в которых находится в диапазоне от 1,18МПа до 15 МПа.

В соответствии с нормами технологических проектов МН включают в себя трубопроводы длиной более 50 км, диаметром от 219 до 1220 мм

включительно, предназначенные для перекачки коммерческой нефти из производственных или складских объектов в пункты потребления. Согласно строительным нормам и правилам Министерства здравоохранения [4] они делятся на четыре класса (см. Рис. 1.2).

Для обеспечения безопасности местоположения вблизи трассы объектов различного назначения и в зависимости от условий эксплуатации в соответствии с СНиП 2.05.06-85* [4] линейная часть и отдельные участки магистральных трубопроводов разделены на следующие категории.

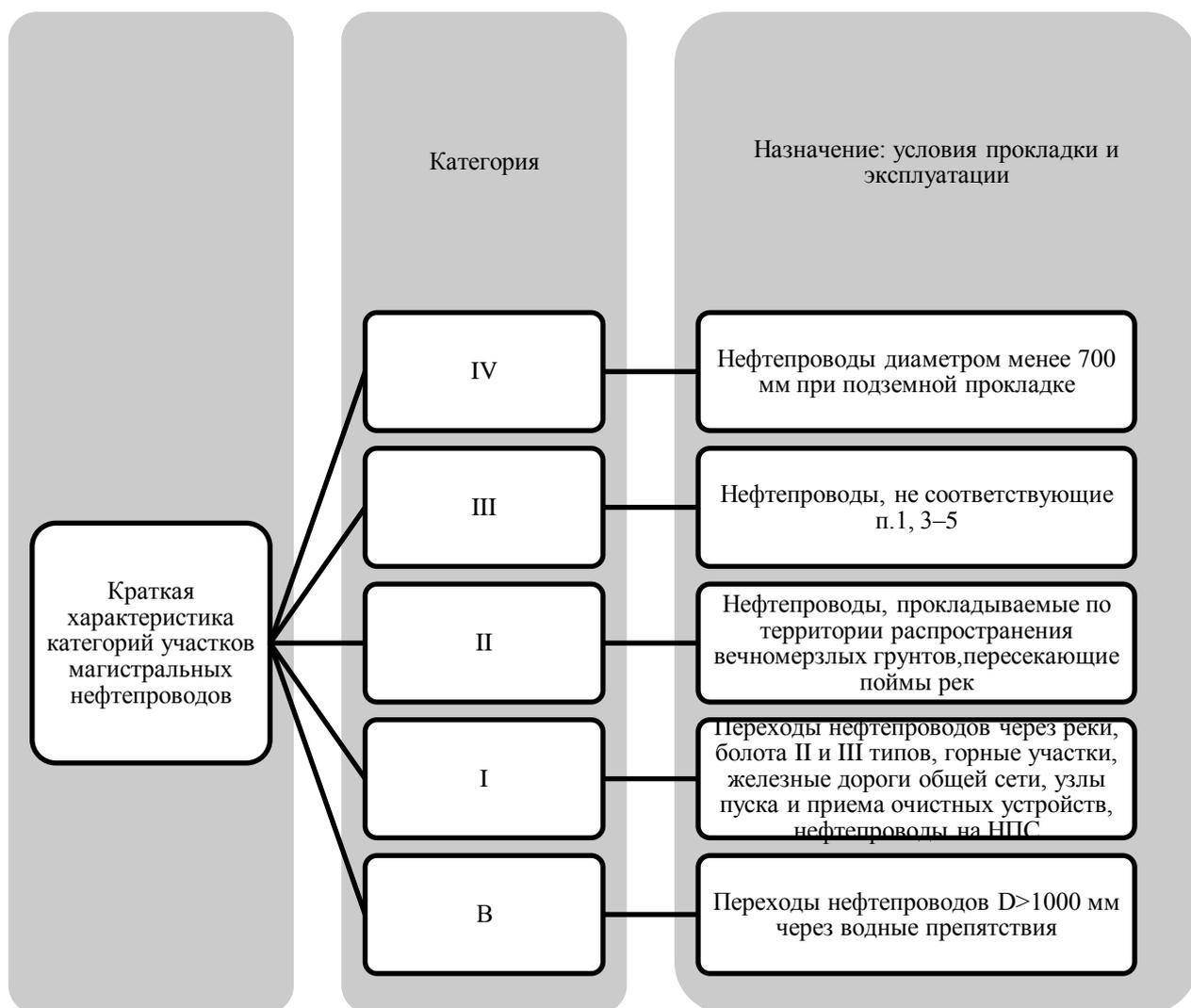


Рисунок 1.2 – Краткая характеристика категорий участков магистральных нефтепроводов

В каждой категории существуют определённые требования к прочности трубопровода, к контролю качества сварных соединений, предварительным гидравлическим испытаниям и типам покрытия. Однако, отдельные участки

Как указывает Г.И. Фукс, потери на трение (сопротивление) о стенки трубопровода может изменяться не только при изменении скорости потока, но и при изменении вязкости нефтепродукта. Чем выше вязкость – тем больше сопротивление и наоборот. Вязкость нефтепродукта возрастает при низких температурах [8].

Как видно из рисунка 1.3, пропускная способность трубопровода возрастает при повышении температуры нефти. Пересечение характеристик насосной и нефтепровода определяет рабочую точку, т.е. значения развиваемого напора и подачи, соответствующие сопротивлению трубопровода. Так на рисунке 1.3 в номинальном режиме рабочей точкой является точка A_2 , при повышении температуры насосная и нефтепровод работают в точке A_3 , а при понижении температуры – в точке A_1 .

В рамках изучения математического моделирования процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа М.В. Лурье добавляет, что «при изменении характеристик насоса или трубопровода происходит автоматическое самовыравнивание, то есть переход на новую рабочую точку, в которой совмещаются напор, развиваемый насосами, и сопротивление нефтепровода при новой подаче» [9].

Для сбора, хранения и приема нефти в соответствующих местах строятся резервуарные парки. Они состоят из нескольких резервуаров и трубопроводов, связанных с ними. Резервуар представляет собой большой вертикально поставленный цилиндр. Металлические резервуары изготавливают из рулонной стали. В верхней части резервуара толщина стенок меньше, чем в нижней [10]. Согласно ГОСТ 31385–2016 металлические резервуары устанавливают над поверхностью земли [11].

Иногда строят железобетонные резервуары. Согласно действующим Правилам технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту, железобетонные резервуары заглубляют ниже уровня земли и засыпают землей. «На крыше резервуаров устанавливают дыхательные клапаны, обеспечивающие

выпуск воздуха при заполнении резервуара или его поступление при откачке из резервуара» [11].

К.В. Фролов, исследуя подробно вопросы машиностроения указывает, что «дыхательные клапаны имеют ограниченную пропускную способность, поэтому скорость поступления жидкости в резервуар (или ее откачки) не должна превышать расчетной величины» [13]. При превышении допустимых значений скорости наполнения резервуара, произойдет скачкообразное увеличение давления воздуха, что грозит повреждением резервуара.

С точки зрения безопасности важно отметить, «на случай неисправности дыхательных клапанов для защиты резервуаров от разрушения на них устанавливаются также предохранительные клапаны, срабатывающие при более высоком давлении» [14]. Предохранительные клапаны рассчитывают на полную подачу по нефтепроводу.

Как справедливо указывают Ю.П. Марцев, М.Е. Елисеева и Т.Ю. основные проблемы с обеспечением безопасности резервуаров нефтехранилищ зависят от их размеров и полезного объема. На сегодняшний день в резервуарном парке нефтебаз используются различные ёмкости объемом от 100 до 50000 м³ [15].

Полезный объем резервуара это разница между минимальным и максимальным его заполнением [16]. По ГОСТ 17032-2010, «минимальный уровень – это уровень, ниже которого не может осуществляться откачка из резервуара по условиям размещения резервуара и насосов. Максимальный уровень определяется из условий полного заполнения резервуара без разрушения его конструкции» [17].

Современные требования к проектированию таких объектов допускают, что на случай неисправности системы автоматики и дистанционного управления конструкцией резервуара допускается превышение заполнения до максимального аварийного уровня. Количество нефтепродукта в резервуаре определяется в зависимости от высоты его заполнения [18].

«Трубопровод между насосными станциями обычно прокладывается под землей. Подземная прокладка получила наибольшее распространение при строительстве трубопроводов больших диаметров. При этом способе создаются наилучшие условия для устойчивой работы трубопровода, обеспечивается высокая эксплуатационная надежность, не создается препятствий для транспорта, помех для сельскохозяйственных работ и животного мира» [19].

Диаметр трубопровода и расстояние между насосными станциями зависят от принятой пропускной способности трубопровода [20].

Нефтепровод проектируется с учетом требуемых объёмов транспортировки нефти. В работе [21] подробно изложены математические модели для расчёта оптимальных параметров трубопровода для строительства, учитывающих все необходимые требования.

Во время продолжительной эксплуатации наблюдается так называемый эффект парафинирования. Эффект заключается в том, что во время перекачки нефти происходит осаждение парафина на стенках нефтепровода, в результате чего уменьшается его внутренний диаметр. Величина отложений парафина на стенках зависит от его содержания в нефти, температуры и скорости потока нефтепродукта. Эффект парафинирования является существенным в разработке [22].

1.3 Промышленная безопасность магистральных нефтепроводов

Одним из важных этапов нефтепереработки является транспортировка нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. Государством закреплены положения, что магистральные трубопроводы относятся к стратегически важным объектам, а сам процесс транспортировки нефти и нефтепродуктов является важным элементом промышленной, экономической, экологической и национальной безопасности [23-25].

Как указано в учебном пособии Ю.Д. Земенкова, для обеспечения штатной работы нефтепроводов необходимо, чтобы их уровень промышленной безопасности соответствовал определённым нормам и правилам, а также

обеспечивалась безопасность от внутренних и внешних угроз [26]. Однако, в рамках данного исследования основоположным будет считать принцип внутреннего контроля для обеспечения техносферной безопасности магистрального трубопровода. Как объект управления в сфере безопасности в основу исследования положим действующий ФЗ № 99045329-2 «О магистральном трубопроводном транспорте», в котором указано, что «под магистральным трубопроводом понимается единый имущественный производственный транспортный комплекс, состоящий из подземных, подводных, наземных и надземных трубопроводов, иных технологических объектов и предназначенный для транспортировки продукции от пунктов ее приемки до пунктов сдачи, технологического хранения или перевалки (передачи) на другой вид транспорта» [27].

Магистральные трубопроводы относятся к объектам повышенной опасности [28], которая определяется совокупностью опасных производственных факторов процесса перекачки и опасных свойств перекачиваемой среды.

Так, в соответствии с Федеральным Законом РФ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» магистральные трубопроводы «в зависимости от уровня потенциальной опасности аварий на них для жизненно важных интересов личности и общества относятся к I классу опасности – опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности» [29].

Согласно Правилам охраны магистральных трубопроводов, «опасными производственными факторами при эксплуатации магистральных трубопроводов являются: возгорание продукта при разрушении трубопровода, открытый огонь и термическое воздействие пожара, как следствие: разрушение трубопровода или его элементов, сопровождающееся разлетом осколков металла и грунта; обрушение и повреждение зданий, сооружений, установок; токсическое воздействие продукции на окружающую среду» [30].

Причиной возникновения вышеуказанных опасных производственных факторов и основной угрозой для состояния защищенности и бесперебойной работы нефтепроводов являются утечки нефти из магистральных трубопроводов.

Согласно РД-13.320.00-КТН-223-09 под утечкой нефти понимается «нарушение герметичности магистрального трубопровода, сопровождающееся истечением из него нефти или нефтепродукта» [31].

Согласно исследованию канд. тех. наук., доцента Ф.С. Зверева, причины возникновения утечки нефти следует классифицировать на возникшие вследствие: внутреннего и внешнего воздействия на трубопровод. К факторам внутреннего воздействия относятся: использование недоброкачественных материалов; старение металла; коррозионные процессы; низкая квалификация работников при строительстве магистральных нефтепроводов.

К факторам внешнего воздействия относятся: акты незаконного вмешательства; форс-мажорные ситуации. [32].

На современном этапе развития нефтяной промышленности основной угрозой для безопасности магистральных трубопроводов являются акты незаконного вмешательства, под которыми следует понимать (согласно ФЗ РФ от 21.07.2011 № 256-ФЗ): «противоправное действие (бездействие), в том числе террористический акт или покушение на его совершение, угрожающее безопасному функционированию объекта топливно-энергетического комплекса, повлекшее за собой причинение вреда жизни и здоровью людей, повреждение или уничтожение имущества либо действие, создавшее угрозу наступления таких последствий» [33].

Уголовным кодексом РФ предусмотрена ответственность за кражу (тайное хищение чужого имущества), совершенную из нефтепровода, нефтепродуктопровода, газопровода (часть 3 ст. 158) и приведение в негодность нефтепроводов, нефтепродуктопроводов, газопроводов (ст. 215.3) [37]. «Под приведением в негодность понимается разрушение, повреждение или приведение иным способом в негодное для эксплуатации состояние

нефтепроводов, нефтепродуктопроводов, газопроводов, а также технологически связанных с ними объектов, сооружений, средств связи, автоматики, сигнализации, которые повлекли или могли повлечь нарушение их нормальной работы и были совершены из корыстных или хулиганских побуждений» [34].

Проблема криминальных врезок в трубопроводы приобрела в последние годы характер бедствия федерального масштаба. Ущерб, наносимый предприятиям, оценивается сотнями миллионов долларов, в то время как эффективность противодействия этому явлению недостаточна. Так, по данным ОАО «АК «Транснефть», всего в период с 2005 по 2015 г. на объектах компании было выявлено порядка 5000 несанкционированных врезок в магистральные нефтепроводы, что составляет около 70% всех совершенных преступлений. Общий ущерб объективно оценить практически невозможно, поскольку на этот показатель влияет слишком много факторов [35].

Основными причинами стабильного роста числа криминальных врезок являются:

- технические и географические особенности деятельности предприятий трубопроводного транспорта;
- доступность и незащищенность трубопроводов, которые характеризуются большой протяженностью, нахождением их на значительном расстоянии от населенных пунктов, наличием подъездных путей, обеспечивающих доступ к трубопроводам грузового транспорта, неглубоким залеганием ниток трубопроводов глубиной 0,5-2 м;
- слабое оперативное обслуживание органами внутренних дел предприятий трубопроводного транспорта, и невысокая эффективность деятельности частных охранных структур, обеспечивающих безопасность объектов нефтяной отрасли;
- проблемы и неэффективность взаимодействия субъектов предупреждения преступности на предприятиях трубопроводного транспорта [36].

В связи с этим приоритетными направлениями предупреждения утечек (в том числе криминальных врезок) из магистральных трубопроводов являются:

- совершенствование системы ведомственной охраны;
- разработка и совершенствование инженерно-технических средств охраны (ИТСО) трубопроводов и *технических методов обнаружения утечек*.

Вместе с тем деятельность охранных подразделений и применение ИТСО не всегда позволяют эффективно выявлять утечки и оперативно реагировать на их устранение. Это обусловлено климатическими и географическими особенностями, огромной протяженностью трубопроводов, а также высокой стоимостью ИТСО.

В связи с этим необходимым направлением предупреждения утечек в магистральных нефтепроводах является разработка и применение технических методов обнаружения утечек, а именно систем обнаружения утечек (СОУ).

1.4 Анализ существующих методов обнаружения утечек нефти

Для внедрения в существующий технологический процесс транспортировки нефти и нефтепродуктов по трубопроводной системе современных подходов и технологий по использованию СОУ, позволяющих в значительной степени повысить уровень промышленной безопасности магистральных нефтепроводов, необходимо провести анализ применяемых методов обнаружения утечек нефти [37-39]. Для более наглядного понимания достоинств и недостатков, описание основных характеристик наиболее распространённых методов обнаружения утечек было собрано в таблицу и приведено в Приложении А.

1.4.1 Метод определения утечек по анализу профиля давления

«Данный метод основывается на моделировании распределения давления вдоль трубопровода и анализе статистики. При нарушении герметичности расход на участке до местоположения образования утечки повышается по отношению к начальному расходу, а расход на участке после местоположения аварийного участка понижается. Таким образом, перепад напора на участке после места нарушения герметичности уменьшается, а до этого местоположения увеличивается, вызывая излом профиля давления и напора.

Изменение шероховатости трубы или вязкости, плотности, температуры нефтепродукта также могут привести к аналогичным последствиям» [40].

Как описано в разработке требований для метода обнаружения утечек в магистральных газопроводах «для диагностики используется «усредненный» профиль распределённого давления, иначе называемый квазистационарным. Такой профиль получают с помощью специальной фильтрации давления в контрольных точках нефтепровода. Квазистационарный профиль распределённого давления также не постоянен, но изменяется гораздо медленнее фактического давления» [40].

«Поэтому анализируют отклонение квазистационарного профиля, которое наблюдается на всех контрольных точках трубопровода» [40].

«Физические свойства нефтепродукта или шероховатость трубопровода не приводят к отклонению квазистационарного профиля от фактического, потому что данные изменения проходят достаточно медленно и квазистационарный профиль вовремя адаптируется к таким процессам» [40].

«Нарушение герметичности вызывает уменьшение давления, которое не сложно выявить. Для предотвращения ложных срабатываний, которые превышают допустимые значения, рассогласование фиксируются как минимум в двух контрольных точках трубопровода» [40].

«Достоинства метода: возможность определения интенсивности утечки; обеспечение постоянного мониторинга контролируемого участка и обработки данных» [40].

«Недостатки метода: возможность применения только при установившемся режиме эксплуатации изотермического трубопровода; возможность частых ложных срабатываний из-за изменения шероховатости труб, вязкости или плотности; невозможность применения в трубопроводных сетях со сбросами и подкачками; снижение точности метода при уменьшении интенсивности утечки; необходимость установки дополнительного измерительного оборудования для создания контрольных точек сравнения расчетного профиля давления и фактического» [41].

1.4.2 Балансовый метод определения утечек нефти

Рассматриваемый метод выявляет скорость прогрессирующих разрывов в нефтепроводе, а также медленно развивающиеся истечения жидкости.

«Балансовый метод определяет истечение нефтепродукта на больших расстояниях между двумя датчиками расхода и более. Метод не определяет местоположение утечки, но для этого применяют дополнительные методы, работающие параллельно. Принцип работы заключается в том, что при нарушении герметичности расход на входе становится больше расхода на выходе. Вдобавок, в балансовом методе учитывается масса продукта в нефтепроводе, которая уменьшается при утечках» [42].

Точность такого метода напрямую зависит от погрешности расходомеров. Нельзя обнаружить утечку, расход которой меньше погрешности измерения расхода. Только относительная погрешность одного прибора относительно другого имеет значения, в отличие от абсолютной величины ошибки измерения. При использовании статистического анализа и результатов долгого наблюдения датчики расхода могут быть настроены относительно друг друга. В свою же очередь, точность учёта изменения количества продукта в нефтепроводе по давлению зависит от погрешности измерения давления и сжимаемости.

Достоинства метода: возможность диагностирования утечек на больших участках нефтепровода; возможность обнаружения как быстро, так и медленно развивающихся утечек, и отборов продукта; использование стандартных контрольно-измерительных приборов (КИП); экономичность; обеспечение постоянного мониторинга контролируемого участка.

Недостатки метода: невозможность определения места утечки или УНВ; точность метода зависит от точности КИП (отсутствует возможность определения УНВ при расходе меньше допустимой ошибки КИП); необходимость требует остановки перекачки по трубопроводу при замене и ремонте турбинных счетчиков; увеличение сложности алгоритма и уменьшение

точности при наличии проектных ответвлений, лупингов и других конструктивных усложнений контролируемого нефтепровода.

1.4.3 Метод «давление-расход» для определения утечек нефти

Давление и расход в трубопроводе тесно взаимосвязаны. Математическая модель, лежащая в основе метода, описывает эту взаимосвязь и применяется для диагностирования утечки. Для настройки модели применяются методы идентификации параметров.

«Для обеспечения корректных граничных условий требуется замерять расход и давление в начале и в конце рассматриваемого участка. Измеренные значения должны иметь соответствующие метки времени» [43].

Рассматриваемый алгоритм определяет факт нарушения герметичности с её координатами, но анализ математической модели вносит большие погрешности из-за неточностей самой модели.

Достоинства метода: использование штатных КИП; определение факта присутствия и координат УНВ; экономичность; обеспечение постоянного мониторинга контролируемого участка трубопровода.

Недостатки метода: низкая точность метода, сложность определения незначительных УНВ; низкая чувствительность метода к величине утечки; невозможность применения при проектных отводах нефти; ложные срабатывания при возникновении местных сопротивлений вследствие загрязнения внутренней полости трубы.

1.4.4 Метод диагностики утечек нефти на основе анализа давлений в изолированных секциях при закрытых задвижках

«Для работы данного метода требуется изоляция участков трубопровода друг от друга путём отсечения задвижками. Метод базируется на сравнении величин уменьшения давления в секциях за определенный интервал времени и позволяет локализовать утечки с малым расходом. В секциях с объемом около 10000 м³ данный метод способен обнаружить утечку с расходом 50 л/мин» [44].

Достоинства метода: возможность быстрого обнаружения даже малых УНВ; возможность применения на любом автоматизированном нефтепроводе. Недостатки метода: необходимость остановки перекачки на определенный период; большая погрешность определения места УНВ (позволяет определить только секцию, на которой есть предполагаемая УНВ); возможность ложных результатов.

1.4.5 Метод определения утечек нефти по «волне давления»

Согласно теории неустановившихся процессов, «в момент образования утечки (или отбора) продукта из нефтепродуктопровода образуются волны разрежения. Волна снижения давления доходит до контрольных точек по обе стороны от утечки. Время прибытия сигналов от датчиков фиксируется на АРМ центрального диспетчерского пункта. Вычислительная процедура анализирует результаты поступающей от датчиков с учётом: времени поступления сигналов, расстояния до датчиков, скорости движения волны снижения давления, эксплуатационных параметров транспортировки и вычисляет место утечки.

Разность моментов подхода волн говорит о смещении места утечки по отношению к центру контролируемого участка. Координата места образования утечки находится через разность моментов подхода волн давления к началу и концу участка нефтепродуктопровода.

Для реализации этого алгоритма специальная программа функционирует в контроллере на контролируемом пункте (КП) или на верхнем уровне. Для ее функционирования требуется иметь показания датчиков давления с периодом времени не более 0,01 секунды» [45]. Для выявления волны давления применяются цифровые фильтры, корреляционный анализ данных.

Если волна зафиксирована, то отправляется сигнал на АРМ верхнего уровня СОУ [46]. Окончательное решение принимает система верхнего уровня. Характеристики метода зависят от динамических характеристик датчиков, уровня зашумлённости, точности синхронизации времени, возможности контроллера перерабатывать информацию с необходимой скоростью, точности определения скорости звука.

На точность влияют стохастические колебания давления, вызванные работой насосных агрегатов, и время развития утечки. Чем медленнее развивается утечка, тем значительно уменьшается точность определения места утечки. При слабом развитии утечки система не способна её обнаруживать.

Достоинства метода: непрерывность контроля во времени; оперативное обнаружение несанкционированных врезок; возможность применения независимо от погодных условий; высокая избирательность.

Недостатки метода: необходимость поддержания внутри нефтепровода давления, которое обеспечивает полное заполнение сечения нефтепродуктом, то есть неработоспособность при наличии самотечных участков на контролируемом нефтепроводе; неработоспособность для участков со сложным рельефом местности, особенно с большими перепадами высот вблизи пункта приема продукта; низкая чувствительность к величине утечки; неработоспособность в стадии сброса продукта при постоянном расходе; сложность фиксации появления утечки в динамике из-за наличия колебаний давления, вызванных работой насосных агрегатов и запорной арматурой; снижение чувствительности метода при последовательной перекачке различных типов продуктов [47].

1.4.6 Методы обнаружения утечек нефти по результатам измерений дополнительных параметров

Радиоактивный метод заключается в использовании специального радиоактивного вещества, которое вводят в трубопровод [48]. При нарушении герметичности трубы происходит излучение радиоактивного вещества, которое легко регистрируется приборами. Данный метод не соответствует требованию оперативного контроля, так как является периодическим [49].

К тому же, данные действия несут опасность для здоровья обслуживающего персонала и окружающей среды, из-за чего радиоактивный метод широко не применяется в диагностике герметичности труб.

Акустический метод основан на измерении шумов, которые возникают при образовании утечки [50]. При образовании утечки в трубе образуется шум

от струи жидкости, связанный ударными силами, трением и вибрациями. Во время передачи образованных шумов на поверхность, тональность каждого из них меняется зависимо от характера истечения, грунта, материала трубопровода и глубины залегания. Основной вклад в шум вносят параметры, определяемые трубопроводом.

Путём сужения частотной полосы возможно исключение лишней составляющей шума, что хорошо скажется на точности определения утечки.

Акустический метод применяют для обнаружения малых утечек (менее 1% от среднего расхода в трубопроводе, нижний предел зависит от вязкости, отверстия в трубопроводе, прокладки трубопровода).

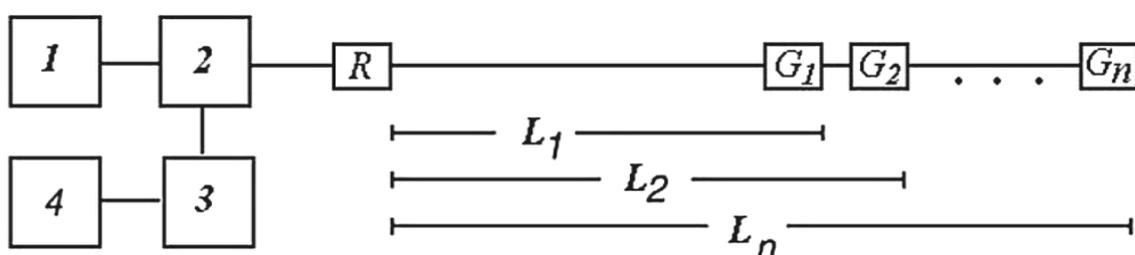
Акустический метод требует установку датчиков между собой на расстоянии порядка 50 м, отсюда следует, что использование данного решения для диагностики герметичности на всем участке нефтепровода большой протяженности нецелесообразно, однако данный способ может быть применен на особо опасных участках.

Волоконно-оптический метод базируется на использовании волоконно-оптического сенсорного кабеля (ВОСК) [44]. По специальной технологии в ВОСК вводятся волоконно-оптические датчики (количество датчиков может достигать 200 шт./м). Волоконно-оптический датчик представляет собой решетку Брэгга, записанную в волокне ультрафиолетовым лазером. Длина волны Брэгга зависит от температуры, давления, вибрации, акустической эмиссии, микродеформации. Таким образом, ВОД обладает многопараметровой чувствительностью.

По технологии развертывания ВОСК может быть реализована, как внешняя, так и внутренняя прокладка трубопровода. Стоит отметить, что для трубопроводов, по которым проходят средства очистки и диагностики (СОД), возможна только внешняя прокладка кабеля. Для контроля утечек углеводородов из трубопроводных транспортных систем разработана зондовая волоконно-оптическая система контроля утечек на основе башне-вытяжных

дифракционных и интерференционных датчиков, общая структурная схема которой показана на рисунке 1.4.

Исследования ЗАО «Омега» технологии позволили разработать систему автоматического непрерывного виброакустического мониторинга протяженного объекта (САМПО), которая может быть использована для обнаружения несанкционированного доступа или воздействий на охраняемый объект, реагирования на нештатные ситуации и т.п. [51].



1 – оптический излучатель;
 2 – волоконно-оптический разветвитель;
 3 – оптико-электронный трансивер;
 4 – устройство обработки и отображения;

R – реперная точка отсчета расстояний;
 Gn– множество внутриволоконных оптических сенсоров;
 Li– расстояния до мест утечек.

Рисунок 1.4 – Структурная схема зондовой волоконно-оптической системы контроля утечек

Основным назначением предлагаемой системы является контроль состояния и охрана магистральных нефте- и газопроводов.

Единичный модуль САМПО представляет собой комплекс оборудования, состоящий из специализированного волоконно-оптического кабеля-датчика (рисунок 1.5), логического модуля (рисунок 1.6) системы и консоли оператора, представляющей собой моноблочный персональный компьютер.

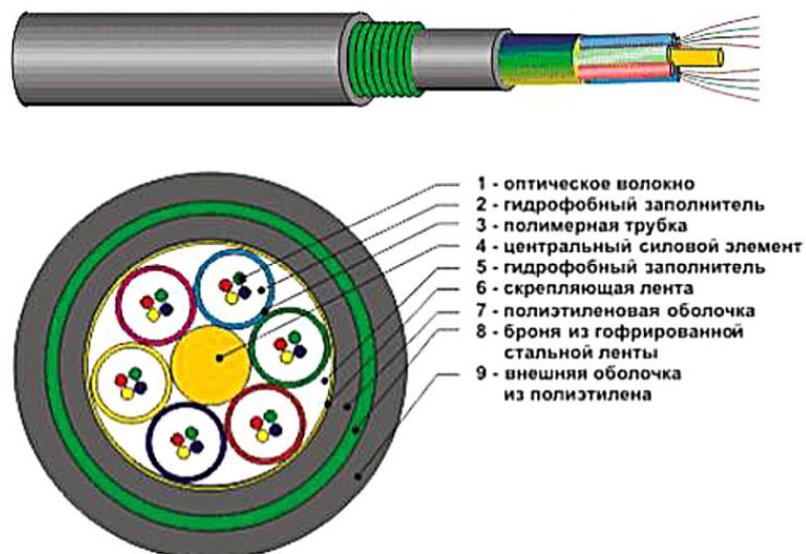


Рисунок 1.5– Волокно-оптический кабель-датчик



Рисунок 1.6 – Логический модуль

1.5 Характеристика места проведения исследования

Исследования проводились на базе промышленной площадки «Грушовая», которая входит в перевалочный комплекс «Шесхарис», длиной 12 км. «Перевалочный комплекс «Шесхарис» входит в структуру АО «Черномортранснефть» - дочернего общества ПАО «Транснефть». «Комплекс расположен в г. Новороссийск и является конечной точкой магистральных нефтепроводов ПАО «Транснефть» в Краснодарском крае, обеспечивающих транспортировку нефти месторождений Западной Сибири, Азербайджана, Казахстана» [52].

В нынешний момент проводится программа по реконструкции, модернизации оборудования, улучшения территории. «В результате масштабной реконструкции уменьшится протяженность технологических трубопроводов, при этом емкость товарных резервуаров возрастет. Реализация инвестиционной программы позволит расширить перечень продуктов перевалки – ПК «Шесхарис» сможет принимать и хранить нефть, мазут, дизельное топливо, бензин» [53].



Рисунок 1.7 – Площадка «Грушовая» [52]

1.6 Информационно-патентный поиск систем обнаружения утечек нефти

«Проблему контроля целостности магистральных трубопроводов изучают с давних пор. Современные исследования посвящены изобретению новых технологий и методов в многочисленных публикациях, в книгах и научных журналах, патентах по созданным системам и устройствам для обнаружения различных по характеристикам утечек в книгах и научных журналах, в патентах

по созданным системам и устройствам для обнаружения различных по характеристикам утечек» [54].

При подготовке представленной работы был осуществлен патентный поиск по теме исследования. «Необходимо отметить, что проблематикой обнаружения утечек нефти и нефтепродуктов из магистральных трубопроводов занимаются во всем мире. Были изучены патенты Советского Союза и России, США, Франции, Англии, Германии и других стран» [54].

«В ходе анализа патентной информации было установлено, что «большая часть разработок для обнаружения утечек на нефте- и нефтепродуктопроводах приходится на разработку параметрических систем контроля и внутритрубных аппаратов. В России доля таких патентов составляет примерно 60%» [54].

У нас в стране оформляются патенты на запускаемые в трубопровод диагностические аппараты и системы, которые путем установки различных устройств вдоль трассы магистрального трубопровода, фиксируют различные физические явления, характерные при наличии утечки (появление нефти на поверхности, вибрация, шум, повышение температуры, превышение в воздухе содержания углеводородов в месте утечки).

На долю систем, идентифицирующих утечки измерением параметров, связанных с перекачкой, или же параметров перекачиваемого продукта, приходится порядка 25% патентных разработок.

Другие изобретения посвящены устройствам и системам, которые позволяют судить о наличии или отсутствии утечки путем облета трассы магистрального трубопровода или же на остановленных трубопроводах.

В свою очередь, ситуация с зарубежными патентами [55] в данном направлении обстоит по-другому.

На долю аппаратуры и устройств приходится около 40%, а на системы диагностики утечек из трубопроводов на основе измеряемых параметров перекачиваемого продукта (давления, расхода жидкости) – свыше 50% всех патентных изобретений. Кратко рассмотрим систему мониторинга целостности трубопровода «101 OLD».

«Система, разработанная шведской фирмой «Combit», широко применяется на современных магистральных нефтепроводах. Система включает в себя локальные станции с «накладными» ультразвуковыми расходомерами, и головную станцию, в которой происходит сбор и анализ информации, поступающей от локальных станций» [54].

В системе определяются два параметра жидкости, вязкость и плотность, учитываемые при расчете расходов. Помимо этого, в системе учитывается геометрические размеры магистрального трубопровода и влияние на жидкость изменения температуры. С этой целью на локальных станциях помимо расходомера устанавливают «накладной» термометр, контролирующей температуры жидкости и трубы, и термометр окружающего воздуха.

В головной станции осуществляется идентификация утечек на основе объемного балансового метода с учетом эпюр температур и давлений вдоль трассы трубопровода. Для этого с локальных станций собирается следующая информация: объем действительный и приведенный к стандартной температуре; скорость потока жидкости в массовых и объемных единицах; температура жидкости и окружающей среды; масса; параметры жидкости: вязкость, плотность и степень аэрации; скорость звука в жидкости.

Система «101 OLD» на основе вычисления разностей объемов жидкости, которые входят и выходят из сегмента нефте- и нефтепродуктопровода между двумя локальными станциями, ежеминутно ведет учет объемного баланса жидкости. Вычисление баланса осуществляется с учетом:

- изменения объема жидкости при колебаниях давления и температуры в трубопроводе;
- временной задержки изменения скорости потока на входе и выходе из участка нефтепровода в случае переходных процессов, когда изменяется производительность трубопровода.

В системе «101 OLD» не ведется учет образования и исчезновения в трубопроводе парогазовых полостей. Данная проблема решаема, но только

путем установки вдоль трубопровода дополнительных расходомеров, что приведет к подорожанию стоимости системы и усложнению ее обслуживания.

Кратко рассмотрим программный комплекс «LeakSpy». Программный комплекс, разработанный ООО «Энергоавтоматика», получил широкое применение на отечественных нефте- и нефтепродуктопроводах. В нем объединено сразу несколько алгоритмов диагностики утечки, которые основаны на различных математических моделях.

В основу комплекса «LeakSpy» лежит цифровая модель мониторинга линейных участков нефтепроводов. Благодаря постоянному потоку телеметрической информации осуществляется наблюдение за технологическими параметрами в реальном времени [56].

Наличие или отсутствие утеки на диагностируемом участке нефтепровода определяется по независимым алгоритмам, работающим при определенном наборе измеряемых параметров.

С целью снижения числа ложных срабатываний и соответственно повышения надежности системы в ней имеется блок предварительного анализа результатов измерений. Показания датчиков подвергаются анализу на согласование с показаниями, полученными от соседних датчиков, физическую допустимость, наличие «дребезга», наводок, недопустимых отклонений и другое. Данный модуль отбраковывает отдельные некачественные измерения и измерительные каналы. Система автоматически принимает к рассмотрению канал измерения при его восстановлении.

В системе с целью исключения ложных срабатываний имеется модуль обучения и адаптации. Адаптация реализована сразу на двух уровнях.

На первом уровне с учетом изменения таких параметров как плотность, скорость звука, температура, вязкость, «дрейф» датчиков и состав нефтепродукта и других, осуществляется автоматическая адаптация модели.

На втором уровне персонал, эксплуатирующий систему, может произвести настройку порогов срабатывания исходя из результатов эксплуатации.

В комплекс «LeakSpy» заложено несколько алгоритмов, но они все функционируют лишь при установившихся режимах перекачки продукта.

Алгоритм обнаружения утечек по волне давления не применим на магистральных трубопроводах с имеющимися самотечными участками движения жидкости. Это связано с тем, что волны давления искажаются самотечным участком, ведущим себя как газовый демпфер. Применимость данного алгоритма может быть достигнута на водных переходах и участках трубопровода с самотечными участками путем установки вдоль трубопровода дорогостоящих динамических датчиков давления и иного оборудования.

В результате анализа патентной информации и современных систем обнаружения утечек, применяемых на магистральных нефтепроводах, можно сделать вывод о том, что разработанные системы обнаружения утечек не обладают достаточной надежностью и универсальностью. Проведенный анализ демонстрирует необходимость дальнейшего исследования данного вопроса и разработки других принципов для создания системы диагностики утечек на трубопроводном транспорте.

1.7 Постановка цели и задач диссертационного исследования

Системы обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах являются ключевым компонентом их промышленной безопасности. В качестве детекторов используются датчики, которые измеряют различные параметры (и их изменения), воздействующие на объект защиты, а также параметры потока нефтепродукта (давление, расход, скорость потока).

Считываемая с датчиков информация проходит обработку, после чего поступает на исполнительные и выводящие устройства (пульт управления, автоматические системы, обеспечивающие работу нефтепровода) [57].

По заключению В.Е. Селезнева и, С.Н. Прялова управляющие элементы уже долгое время используются для улучшения качества управления сложных объектов. В комплексных технологических решениях по управлению, стоит

задача поиска адекватной обратной связи, которая обеспечит надёжный отзыв о внешнем сигнале о состоянии объекта [58].

Современный этап развития технологии характеризуется большим количеством полуавтоматических или автоматизированных систем управления, в которых функцию блока управления, обеспечивающего достижения цели управления и качества, выполняет человек-оператор.

В данной интерпретации задача синтеза системы обнаружения утечек нефти заключается в замене человека-оператора автоматическим устройством, которое вырабатывает управляющие воздействия по сигналам, поступающим с приборов (датчиков), определяющих состояние объекта защиты.

Методы создания блоков автоматического управления или решения задачи синтеза управляемых систем можно разделить на три класса.

К первому классу, сегодня наиболее используемому, следует отнести инженерные методы синтеза. Эти методы включают детальное подробное исследование объекта управления и самой задачи, которая ставится перед системой управления. Далее на основе опыта разработчика, его интуиции и результатов анализа экспериментальных данных конструируется структура системы управления.

Ко второму классу методов для решения задачи синтеза следует отнести математические или численные методы. Эти методы рассматривают только математическую модель объекта.

К третьему классу относятся методы искусственного интеллекта.

Структура и параметры синтезированной управляемой системы должны получаться в результате применения этих методов к рассматриваемой математической модели объекта. Математические методы синтеза не являются альтернативой инженерных методов, а скорее предназначены в помощь им для замены интуитивных решений математически обоснованными или найденными с помощью численных методов структурами и параметрами. В частности, полученные результаты могут быть использованы для обучения нейросетей.

Оптимальный процесс управления подразумевает достижение наивысшей оценки качества управления организационно-техническими системами (в частности, системами обнаружения утечек нефти).

Наметились три подхода к определению качества процесса управления и такие его принципы (рисунок 1.8):

Вышесказанное позволяет произвести постановку цели диссертационного исследования, а также основных задач, которые необходимо решить для достижения данной цели.

Базовые принципы	Принципы, на которых базируется оценка качества процесса управления:
<ul style="list-style-type: none">• качество отождествляется с главным свойством процесса управления;• качество рассматривается с точки зрения соответствия стандартам;• качество рассматривается с точки зрения комплекса составляющих с учетом эффективности процесса управления.	<ul style="list-style-type: none">• принцип сравнительного характера оценки – определяет основное выполняемое действие при оценивании;• принцип зависимости оценки от оцениваемых свойств – является предпосылкой для построения функциональных зависимостей (мер), описывающих то или иное качество процесса;• принцип существования базы оценки;• принцип субъективности оценки – предполагает зависимость оценки не только от процесса, но и от субъекта, его целей, потребностей, интересов;• принцип изменчивости оценок во времени – отражает зависимость оценок от изменения требований, предъявляемых к процессу с ростом технического прогресса и накопления знаний;• принцип полноты оценки – предполагает, что качество процесса зависит не только от объема знаний, но и от способности применять их на практике;• принцип релятивности оценок – позволяет установить, как абсолютное, так и относительное значение оценок;• принцип непротиворечивости оценок – связан с категорией полярных качеств, которым в пространстве мер качества соответствуют крайние значения. Значения мер непротиворечивых показателей заполняют дискретное пространство точек между крайними значениями.

Рисунок 1.8 – Принципы управления нейронной сетью обнаружения утечек нефтепровода

1.8 Выводы по первому разделу

1. Одним из важных этапов нефтепереработки является транспортировка нефти и нефтепродуктов по магистральным трубопроводам. Магистральные трубопроводы относятся к стратегически важным объектам, а сам процесс транспортировки нефти и нефтепродуктов является важным элементом промышленной, экономической, экологической и национальной безопасности.

2. Проблема криминальных врезок в трубопроводы в последние годы приобрела характер бедствия федерального масштаба. Ущерб, наносимый предприятиям, оценивается сотнями миллионов долларов, в то время как эффективность противодействия этому явлению недостаточна.

3. Утечка в магистральных трубопроводах может быть вызвана нарушением технических правил эксплуатации и внешних факторов, создающих угрозу ЧС. Необходимым направлением предупреждения утечек в магистральных нефтепроводах является разработка и применение технических методов обнаружения утечек, а именно систем обнаружения утечек (СОУ).

4. На современном этапе разработанные системы обнаружения утечек не обладают достаточной надежностью и универсальностью. Проведенный анализ демонстрирует необходимость дальнейшего исследования данного вопроса и разработки других принципов для создания системы диагностики утечек на трубопроводном транспорте.

5. Методы создания блоков автоматического управления или решения задачи синтеза управляемых систем можно разделить на три класса. К первому классу, сегодня наиболее используемому, следует отнести инженерные методы синтеза. Ко второму классу методов для решения задачи синтеза следует отнести математические или численные методы. К третьему классу относятся методы искусственного интеллекта.

6. Целью представленного диссертационного исследования является повышение уровня промышленной безопасности на магистральных нефтепроводах путем совершенствования метода управления параметрами системы обнаружения утечек нефти.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК НЕФТИ ИЗ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

2.1 Оптимальный процесс обработки данных об обнаружении утечек нефти

В наши дни развитие электронной вычислительной техники достигла такого уровня, что решение задач, которые еще не так давно не представлялось возможным разрешить без участия оператора, сегодня уже не является проблемой.

Имеющиеся на сегодняшний день микропроцессорные комплексы позволяют существенно проще решать вопросы синтеза блоков управления параметрами различных устройств.

Если в прошлом для управления параметрами технологического процесса использовались системы, основанные на аналоговой элементной базе, или же ручные регуляторы, то в наше время применение современных компьютеров и микроконтроллеров позволяет на качественно более высоком уровне вести разработку блоков управления параметрами различных систем, в том числе и систем обнаружения утечек нефти.

Применение новой элементной базы позволяет реализовывать методы и алгоритмы ТАУ прямо в самом блоке управления (регулирования).

Одним из преимуществ такого подхода является то, что теперь вовсе не обязательно для управления объектом обладать исчерпывающей информацией о динамике системы. В реальности, анализом параметров (показателей) занимается исполнительный регулятор, который в дальнейшем и управляет переводом динамической системы из одного состояния в другое.

Отражение такой реализации процесса управления представлено на структурной схеме (рисунок 2.1). На данном рисунке в качестве исполнительного регулятора выступает блок управления параметрами совместно с исполнительными устройствами. Здесь U – вектор начальных параметров (показателей), а \tilde{U} является уже вектором управляющих параметров.

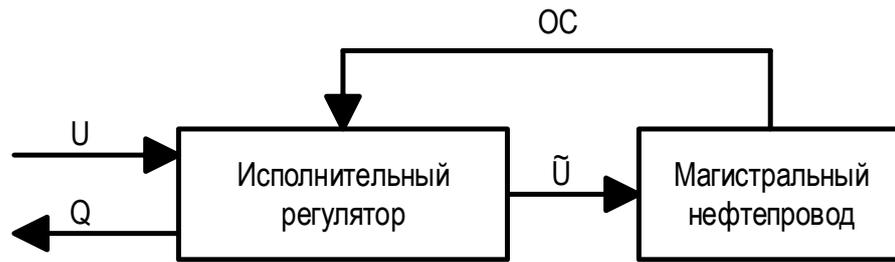


Рисунок 2.1 – Структурная схема процесса управления магистральным нефтепроводом

При этом исполнительный регулятор также выдает параметры для контроля состояния системы. Это отражено на схеме вектором Q .

Объект управления может воздействовать на исполнительный регулятор посредством обратной связи (ОС).

С одной стороны, указанный подход позволяет существенно упростить задачу регулирования параметров магистрального нефтепровода (в частности, управление утечками нефти), но в то же время он имеет и некоторые серьезные недостатки. Обычно эти недостатки зависят от конкретной реализации метода управления, который «зашит» в исполнительный регулятор.

В большинстве случаев исполнительный регулятор проектируется не для отдельной системы, а для определенного класса таких систем. В связи с чем, особенности отдельно взятой системы нельзя учесть в алгоритме работы этого универсального регулятора.

Также встречаются ситуации, когда возникает необходимость располагать динамическими характеристиками изменяющегося процесса, но при этом исполнительный регулятор не может этого обеспечить.

Описанные выше недостатки можно устранить путем введения в схему, представленную на рисунке 2.1, дополнительного (вспомогательного) блока управления параметрами (данными об обнаружении утечек нефти).

При этом данные о состоянии объекта могут быть получены, как непосредственно от самого объекта, так и от исполнительного регулятора, что

делает процесс регулирования более гибким. Отражение данной реализации процесса управления представлено на структурной схеме (рисунок 2.2).

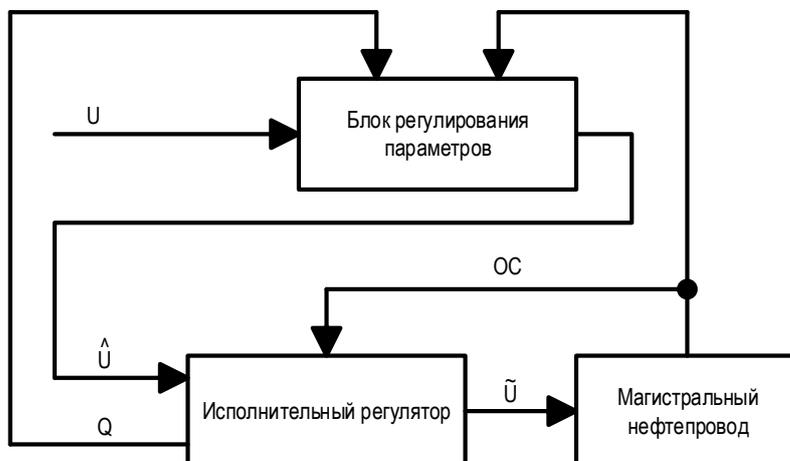


Рисунок 2.2 – Модернизированная структурная схема процесса управления магистральным нефтепроводом

На рисунке 2.2 в качестве блока регулирования параметров (БРП) выступает вспомогательный контур управления. Здесь U – вектор начальных параметров (желаемые параметры объекта), \hat{U} является уже вектором управляющего воздействия, который вырабатывается БРП.

Применение вспомогательного контура управления делает возможным качественное повышение динамических характеристик объекта.

Также при этом появляется возможность существенного сокращения расходов, направленных на приобретение нового дорогого оборудования, необходимого при реализации исполнительных устройств.

Это связано с тем, что в большинстве случаев исполнительный регулятор проектируется не для отдельной системы, а для определенного класса таких систем, в связи с чем, особенности отдельно взятого объекта нельзя учесть в алгоритме функционирования этого универсального регулятора.

Таким образом, анализируя систему, представленную на рисунке 2.1, можно сказать, что введение в нее вспомогательного контура управления делает возможным учет индивидуальных особенностей объектов управления (в

том числе и управления обнаружением утечек нефти). В свою очередь, это ведет к повышению стабильности работы всей системы.

Также нужно отметить, что при проектировании вспомогательного контура управления могут появиться только вычислительные вопросы реализации методики управления (алгоритма работы) для контура. Это ведет к минимизации временных затрат на проектирование.

Сегодня нет практически ни одной области науки, которая бы не использовала в своем арсенале в той или иной степени методы и средства такого направления как моделирование.

Моделирование позволяет на более качественном уровне изучать различные процессы и объекты. Применение этого направления при решении задач управления и регулирования трудно переоценить. Моделирование является основой для анализа и синтеза управляемых систем.

В сфере ТАУ можно отметить применение методов пространства состояний. Использование данного направления в теории автоматического управления стало развиваться в середине прошлого века благодаря работам Л.С. Понтрягина, а также изучению динамического программирования.

Отдельно необходимо выделить такое направление как нейросетевые технологии, которое сегодня получают все большее развитие [59, 60].

2.2 Исследование алгоритмов обработки данных от датчиков избыточного давления

Математическое моделирование технологических, промышленных систем, объектов является одной из наиболее перспективных и быстро развивающихся областей науки.

Так, как процессы, протекающие в нефтепроводах отличаются своей сложностью и постоянным изменением рабочих параметров, необходимо как можно наиболее точно отображать реальную картину происходящего. Для того, чтобы своевременно и адекватно реагировать на физические процессы,

происходящие в нефтепроводах, необходимо использовать прогнозирование и наиболее точные математические модели [61].

С другой стороны, в современных условиях в науке и технике существует устойчивая тенденция, связанная с необходимостью решения широкого спектра задач в оптимизационной постановке.

Применяемые для этой цели методы весьма разнообразны, но далеко не все из этих задач могут быть решены с использованием традиционных подходов при условии наличия незначительного количества вспомогательной информации, известной априори.

Самыми сложными для решения являются такие задачи, которые представляют практический интерес и содержат следующие свойства [62]:

- необходимостью поиска глобального оптимума;
- сложным ландшафтом поверхности поиска;
- многомерностью и многоэкстремальностью задач с ограничениями;
- отсутствием аналитических выражений для целевых функций, а, следовательно, их алгоритмическим представлением и высокой вычислительной сложностью, что предполагает использование громоздких численных методов и часто является непростой самостоятельной задачей;
- недифференцируемостью и нелинейностью;
- наличием дискретных и непрерывных переменных в функции цели;
- NP-трудностью задачи.

Условно методы решения задачи оптимизации делят на детерминированные и стохастические, т.е. характеризующиеся организацией поиска без и с применением соответственно псевдослучайных элементов.

В современных областях техники и промышленности всё шире используются стохастические методы поиска, использующие случайные величины и вероятности. Учитывая распространённость хаотичных и турбулентных явлений в окружающем мире, эти методы, позволяют находить оптимальные решения, которые не всегда возможно определить точными моделями или измерениями [63].

В основе стохастических методов поиска экстремума заложены некоторые правила, носящие названия эвристик, выполнение которых позволяет в результате осуществления последовательности итерационных шагов добиться нахождения оптимума.

Решение задач оптимизации не относится к числу тривиальных. В случае применения для этих целей детерминированных методов локального поиска часто используют стратегию мультистарта, которая не гарантирует в конечном итоге нахождения глобального оптимума.

Стохастические методы поиска являются более перспективными для этих целей, так как исследуют все пространство поиска значительно эффективнее с последующей локализацией в областях, представляющих наибольший интерес.

Бионические методы оптимизации, в основу которых лежат заимствованные у природы процессы, обеспечивающие адаптивный поиск широко применяются в математическом моделировании и процессах оптимизации. [64, 65].

Наибольшую известность среди эволюционных метаэвристических методов оптимизации получили генетические алгоритмы, применение которых широко освещено в обширной специальной литературе и описание которых не является целью представленной работы.

В свою очередь поведенческие методы основаны на моделировании коллективного поведения самоорганизующихся систем, состоящих из взаимодействующих элементов.

«Таким образом, поведенческие метаэвристические методы оптимизации моделируют не эволюцию, а коллективный разум.

В основе поведенческих метаэвристических методов оптимизации заложена бионическая идея коллективной адаптации, то есть, механизм распространения информации в «стае», «рое», «косяке», что обусловлено превосходством группового интеллекта над умственными способностями одного отдельного индивидуума» [66].

В настоящее время известным является целый ряд бионических популяционных метаэвристических поведенческих алгоритмов, среди которых муравьиный, пчелиный, кукушки, светлячков, обезьяний, бактерий и другие.

Оптимизация роем частиц (Particle Swarm Optimization – PSO), эффективно применяется для решения разнородных оптимизационных задач: непрерывной, дискретной, комбинаторной и многокритериальной [67].

Алгоритм оптимизации роем частиц PSO (Particle Swarm Optimization) относится к бионическим мультиагентным методам глобальной оптимизации, моделирующим социальное поведение взаимодействующих агентов.

Идея и использование метода PSO принадлежит J. Kennedy и R. Eberhart, которые успешно апробировали его для многокритериального оптимизационного анализа и обучения нейросетей [68].

Корни роевой оптимизации уходят в еще более ранние работы по компьютерному моделированию перемещения живых существ в птичьей стае или косяке рыб [69, 70].

В работе J. Kennedy, и R.C. Eberhart высказана идея, ставшая основой метода: «Отдельные индивиды роя обучаются опытом других индивидов роя при поиске добычи (места, спасения) Данное свойство становится определяющим и опережает конкуренцию, особенно, когда ценные ресурсы (пути выхода, безопасные места) располагаются неизвестным образом [68].

То есть социальное разделение информации среди представителей одного вида дает эволюционные выгоды всем членам популяции.

Эта гипотеза доминирования коллективного интеллекта стала фундаментальной при разработке оптимизации роем частиц.

2.3 Применение метаэвристических поведенческих алгоритмов

2.3.1 Описание классического алгоритма оптимизации роем частиц

Задача безусловной глобальной оптимизации формулируется как задача минимизации целевой функции $f(X)$ в пространстве поиска D :

$$f(X) \rightarrow \min, \quad X \in D = \{x \in R^d\}, \quad (2.1)$$

где область D представляет собой вещественный гиперкуб с размерностью

d , X векторный аргумент оптимизируемой функции f , а ее глобальное решение достигается в точке X^* .

В методе PSO рой частиц представляет собой совокупность точек-решений, перемещающихся в пространстве в поисках глобального оптимума.

При своем движении частицы пытаются улучшить найденное ими ранее решение и обмениваются информацией со своими соседями.

Обозначим совокупность позиций частиц роя формулой 2.2 через

$$X = x_1, x_2, \dots, x_s, \quad (2.2)$$

где S – количество частиц в рое.

Под позицией i -й частицы понимается совокупность ее координат $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ в пространстве поиска размерностью d : $i=1, s$. При проведении оптимизации обычно достаточно 10-30 частиц.

С помощью роя существует возможность нахождения оптимального решения, даже в случаях, когда число частиц не соответствует минимальному критерию. На первой стадии работы алгоритма оптимизации роя частиц выполняется случайная активация роя. При отсутствии входящей информации, положение частиц генерируются по формуле 2.3

$$x_{ij} = rand(x_{j \min}, x_{j \max}), \quad (2.3)$$

где x_{ij} – j -я координата i -й частицы;

$rand(x_{j \min}, x_{j \max})$ – случайное число с равномерным законом распределения на интервале, определяющем границы пространства поиска для j -го измерения.

С роем частиц также ассоциируется множество векторов их скоростей:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\} \quad (2.4)$$

На начальном этапе все скорости можно считать равными нулю. Однако практика показывает, что более хорошие результаты дает формула 2.5 [71]:

$$v_{ij} = \frac{\text{rand} \cdot x_{j \min} \cdot x_{j \max} - x_{ij}}{2}, \quad (2.5)$$

где v_{ij} – j -я компонента скорости i -й частицы. Рассматриваемый способ задания стартовых скоростей частиц

Рассматриваемый метод образования стартовых скоростей частиц обеспечивает условия, что на следующей стадии процесса обучения ни одна из частиц не окажется вне поискового пространства.

На последующих шагах алгоритма компоненты скоростей и позиций частиц обновляются по формулам 2.6:

$$\begin{aligned} v'_{ij} &= wv_{ij} + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}) + c_2 r_2 (g_j - x_{ij}) \\ x'_{ij} &= x_{ij} + v'_{ij} \end{aligned} \quad (2.6)$$

где v'_{ij}, x'_{ij} – новая скорость и положение i -й частицы;

p_i – наилучшее положение, найденное ею ранее; g – лучшее решение, найденное всем роем;

w – инерционный коэффициент;

c_1 и c_2 – соответственно когнитивный и социальный коэффициенты;

r_1, r_2 – случайные числа, равномерно генерируемые на интервале $[0,1]$, разные для каждой координаты. В формулах (2.6) предполагается, что время между обновлениями состояния частиц роя $\Delta t = 1$.

Если в процессе оптимизации частица выходит за пределы пространства поиска, происходит обнуление соответствующих компонент ее скорости, а сама частица возвращается к ближайшей границе.

Инерционный коэффициент w определяет влияние предыдущей скорости частицы на ее новое значение.

Величина когнитивного коэффициента c характеризует степень индивидуального поведения частицы и ее стремление возвращаться к наилучшему найденному ею ранее решению, в то время как значение социального коэффициента c_2 задает степень коллективного поведения и стремление двигаться в сторону наилучшего решения ее соседей (рисунок 2.3).

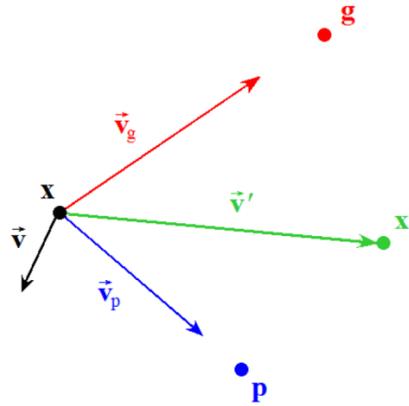


Рисунок 2.3 – Геометрическая иллюстрация правила обновления скоростей

На рисунке 2.3 через $v_p = c_1 r_1 (p - x)$ и $v_g = c_2 r_2 (g - x)$ обозначаются соответственно когнитивная и социальная составляющая вновь образованной скорости частицы. Числа r_1, r_2 генерируются случайным образом, обеспечивая процесс самообучения поиском.

Весовые коэффициенты уравнения (2.6) лежат в приведённых ниже диапазонах [72]:

$$\begin{aligned} 0 < w &\leq 1 \\ 1 < c_1, c_2 &\leq 2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

которые обеспечивают сходимость данного метода оптимизации.

Для поддержания баланса между локальным и глобальным поиском, численные значения коэффициентов c_1 и c_2 обычно выбираются равными.

«Стагнационный анализ, проведенный в исследовании [72], показал, что численные значения коэффициентов $w = \frac{1}{2 \ln 2} \approx 0,72$ и $c = 0,5 + \ln 2 \approx 1,19$ обеспечивают в большинстве случаев наилучшие результаты и стабильность

поиска. Также возможны различные способы динамической подстройки параметров роя, однако адаптация требует дополнительных начальных итераций алгоритма, что может привести к увеличению количества вычислений целевой функции, необходимых для нахождения оптимума» [72].

Рой обладает памятью о наилучших решениях, найденных его отдельными частицами и всем роем в целом. Во время инициализации начальные позиции частиц считаются наилучшими. На каждой последующей итерации алгоритма PSO после применения формул (2.6) индивидуальные лучшие позиции каждой частицы p_i и наилучшее найденное роем решение g обновляются по правилам:

$$\begin{aligned} p_i &= x_i, \text{ если } f(x_i) < f(p_i) \\ g &= p_i, \text{ если } f(g) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Разработаем псевдокод канонического алгоритма оптимизации роем частиц (Приложение Б).

Конкретная реализация инструкций псевдокода зависит от используемого языка программирования.

Так как решение роя g является наилучшим решением, найденным одной из его частиц, то достаточно лишь помнить ее номер $gbest$. Если глобальное лучшее решение роя совпадает с наилучшим решением, найденным частицей, то добавление социального компонента скорости $c_2r_2(g-x)$ не производится.

2.3.2 Выбор топологии связей роя частиц

Ключевой особенностью метода PSO является наличие связей между частицами, которые определяют, насколько эффективен процесс передачи информации между отдельными агентами роя.

Выделяется два основных подхода их организации: $gbest$ и $lbest$.

Каноническая версия PSO использует подход $gbest$, в этом случае каждая частица роя связана со всеми остальными частицами – топология «звезда» (рисунок 2.4, а).

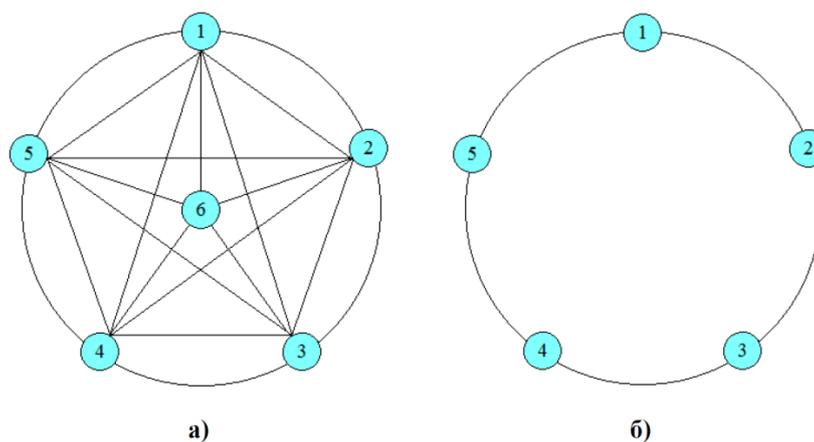


Рисунок 2.4 – Варианты топологии роя частиц: «звезда» (а) и «кольцо» (б)

В результате каждая частица стремится перемещаться в сторону наилучшего решения g , найденного всем роем. В локальном методе *lbest* частица обменивается информацией лишь с несколькими соседями, ориентируясь на наилучшее найденное ими решение g_i .

При этом соседство не обязательно означает, что частицы находятся рядом, а лишь определяет, какие особи роя информируют данную i -ю частицу.

«При использовании подхода *gbest* рой, как правило, быстрее сходится к решению, однако высокая скорость сходимости приводит к менее подробному исследованию пространства решений. В методе *lbest* скорость сходимости к решению ниже, однако, вероятность попадания в локальный оптимум меньше», что показано в работе [72].

Во время выполнения процессов, которые требуют многозадачности и задач высокой сложности и размерности, наличие малого количества соседей у частицы будет давать определённые преимущества в самообучении нейронной сети. Однако, увеличение числа частиц соседей-информаторов повышает скорость сходимости алгоритма.

Для повышения эффективности работы алгоритма самообучения желательно использовать различное количество информаторов, вплоть до их отсутствия.

На рисунке 2.5 показан пример случайной топологии соседства в рое, состоящем из 10 частиц, который разбит на три подроя: $\{1,2,5,8\}$, $\{3,4,6,9,10\}$ и

{7}. Как видно из рисунка, в составе последнего подроя находится одна частица без информаторов.

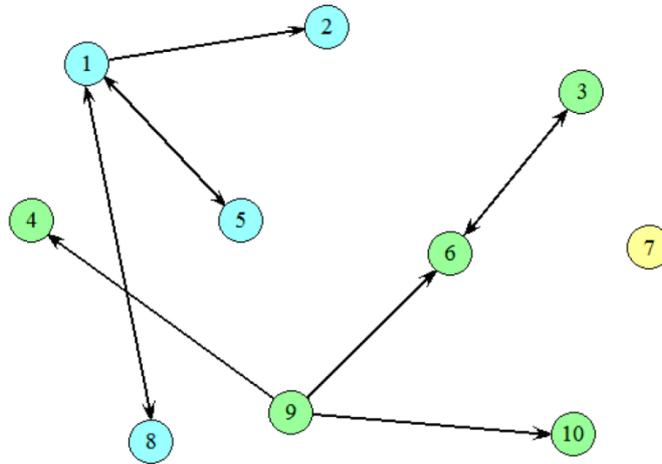


Рисунок 2.5 – Пример случайной организации связей между частицами

Один из вариантов организации роя, который рассматривается в настоящей работе, каждая частица, в среднем, имеет по одному информатору. Матрица связей, которая отвечает вышеупомянутому условию представлена на рисунке ниже:

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Топология связей частиц изменяется на протяжении всей работы алгоритма обучения. После каждой итерации, связи информатор-информируемый между частицами обновляются до тех пор, пока не будет найдено глобальное решение роя g .

Такое положение во время поиска глобального решения может свидетельствовать, что вновь образованная топология роя оказалась неудачной и её необходимо изменить, перестроив связи.

При случайной организации связей, каждая частица должна информировать не более K других частиц.

Расчёт вероятности $p(n)$ количества n информаторов, включая саму частицу, можно определить с помощью формулы 2.10 [73]:

$$p(n) = C_{s-1}^{n-1} \left(\frac{K}{s}\right)^{n-1} \left(1 - \frac{K}{s}\right)^{s-n} \quad (2.10)$$

где C_{s-1}^{n-1} – число сочетаний из $(s-1)$ элементов по $(n-1)$ элементу.

График распределения вероятности установки различного количества связей между частицами роя для нескольких значений K при размере роя $s=20$ показан на рисунке 2.6.

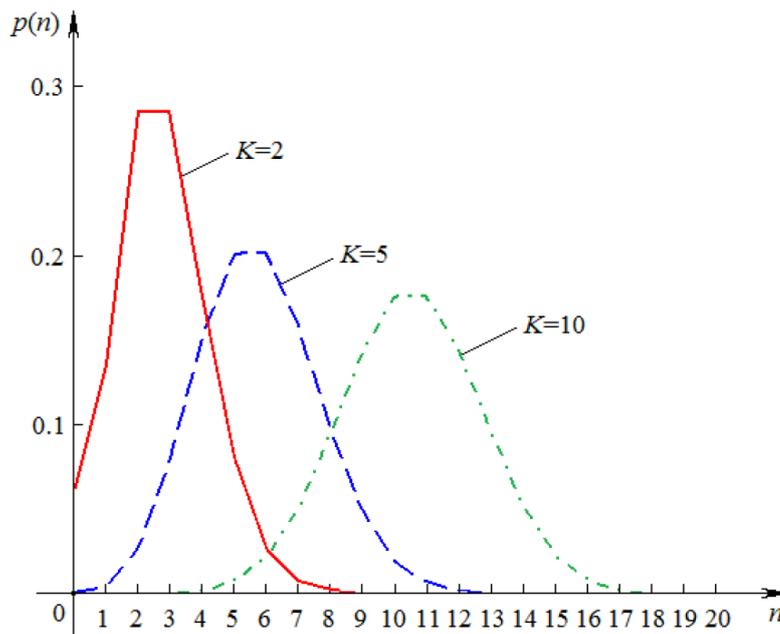


Рисунок 2.6 – Распределение вероятности установки n связей

График на рисунке 2.6 наглядно демонстрирует, что малое количество информаторов отдельно взятой частицы полезно для локального поиска, когда их большее количество позволяет точнее организовывать глобальный поиск и прочие образовательные процессы в рое [74].

Существуют и другие типы топологии связей в рое, такие как топология «двумерный тор» (топология фон Неймана), топология «кластер» и др., но они редко используются на практике, так как не имеют значительных преимуществ перед описанными способами организации связей между частицами.

2.4 Применение самоорганизующихся карт Кохонена

СОКК – это сеть взаимодействующих частиц, построенная по принципу нейронной, в которой реализован принцип обучения без учителя (самообучения). Самоорганизуясь, СОКК преобразует входящую информацию благодаря полученному опыту [75].

Основным их назначением является кластеризация образцов, то есть разделение образцов на группы (кластеры) по тем или иным признакам. Если пропустить «параметры» всех элементов через сеть Кохонена, то на выходе получим определенное количество групп, при этом должны выполняться следующие условия: образцы, относящиеся к одной и той же группе, должны быть подобны друг другу в некотором смысле а группы, подобные друг другу, в свою очередь размещаться близко друг к другу. В данном примере все элементы поделены на 2 группы. При дальнейшем обучении сети от группы легкоатлетов может отделиться группа бегунов. И тогда, следя второму из перечисленных свойств, группа бегунов должна располагаться близко к группе легкоатлетов и далеко от группы баскетболистов. Вот так в общих чертах и работают сети данного типа. [76]

Нейронная сеть Кохонена в отличие от рассмотренных нами ранее сетей [99,100], обучается без учителя и носит название самоорганизующейся карты Кохонена (SOFM – Self-Organizing Feature Map).

Рассмотрим суть работы самоорганизующихся карт Кохонена.

Обычно стараются задавать количество выходных элементов меньшим, чем количество входных, в таком случае сеть позволяет получить упрощенную характеристику объектов для дальнейшей работы с ними.



Рисунок 2.7 – Суть работы самоорганизующихся карт Кохонена

Также необходимо остановиться на структуре связей между элементами сети. Каждый входной элемент соединяется с каждым выходным, и все связи, так же, как и для других нейронных сетей, имеют определенный вес, который корректируется в процессе обучения.

Но прежде, чем переходить к обсуждению тонкостей обучения сетей Кохонена, разберемся, как вообще сеть должна работать. При подаче какого-либо вектора на вход сеть должна определить, к какому из кластеров этот вектор ближе всего. В качестве критерия близости может быть выбран критерий минимальности квадрата евклидова расстояния. Рассмотрим входной вектор как точку в n -мерном пространстве (n – количество координат вектора, это число равно числу входных нейронов). Тогда нам нужно вычислить расстояние между этой точкой и центрами разных кластеров и определить, расстояние до какого из кластеров окажется минимальным. Тогда этот кластер (и соответствующий ему выходной нейрон) объявляется победителем.

Нейронные сети обычно организованы слоями. Слои состоят из нескольких взаимосвязанных узлов, которые содержат функцию активации. Информация подается на входной слой, который связан с одним или несколькими скрытыми слоями, где фактическая обработка данных осуществляется через систему взвешенных связей [71]. Затем скрытые слои соединяются с выходным слоем, на котором выводится ответ нейронной сети, (рисунок 2.8).

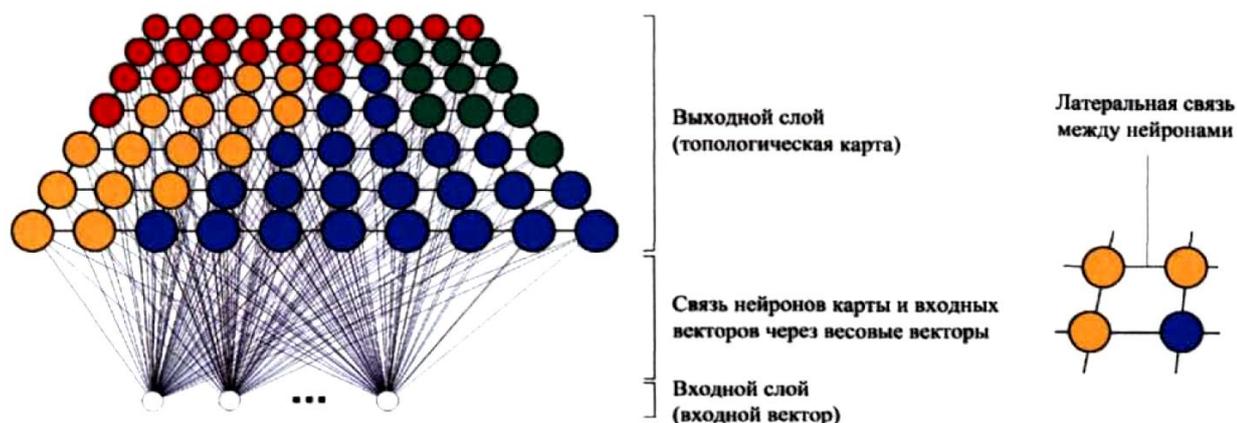


Рисунок 2.8 – Два слоя сети Кохонена классической модели

«В отличие от обучения с учителем, рассмотренного ранее, суть обучения состоит не в том, чтобы сравнивать вывод сети с идеальным выводом, а в подстройке весов всех связей для максимального совпадения со входными данными.

Кроме того, меняется и радиус, определяющий какое количество элементов сети, будут подвергнуты корректировке весов.

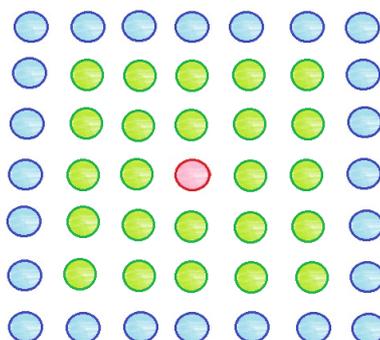


Рисунок 2.9 – Начало алгоритма обучения

Выходные (кластерные) элементы сети Кохонена обычно представляют расположенными тем или иным образом в двумерном пространстве. Разместим, к примеру, выходные элементы в виде квадратной сетки и зададим начальный радиус обучения равным 2. Подаем на вход сети вектор и элементом-победителем оказывается нейрон, обозначенный на схеме красным цветом. По алгоритму обучения следует обновить значения весов для этого нейрона, а

также для тех, которые попадают в круг заданного радиуса» [72] (в данном случае 2) – эти элементы выделены зеленым (рисунок 2.9):

«Ближе к концу процесса обучения радиус уменьшается (рисунок 2.10). Пусть он стал равным единице, тогда обновляться будут веса следующих элементов» [72]:

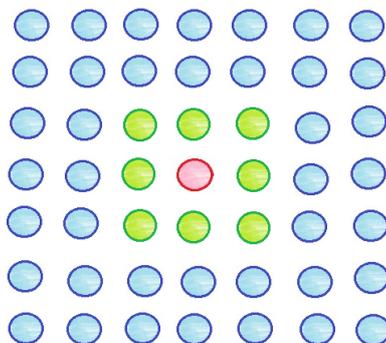


Рисунок 2.10 – Порядок алгоритма обучения [76]

Остановка обучения происходит в том случае, если величины изменения весов становятся очень маленькими.

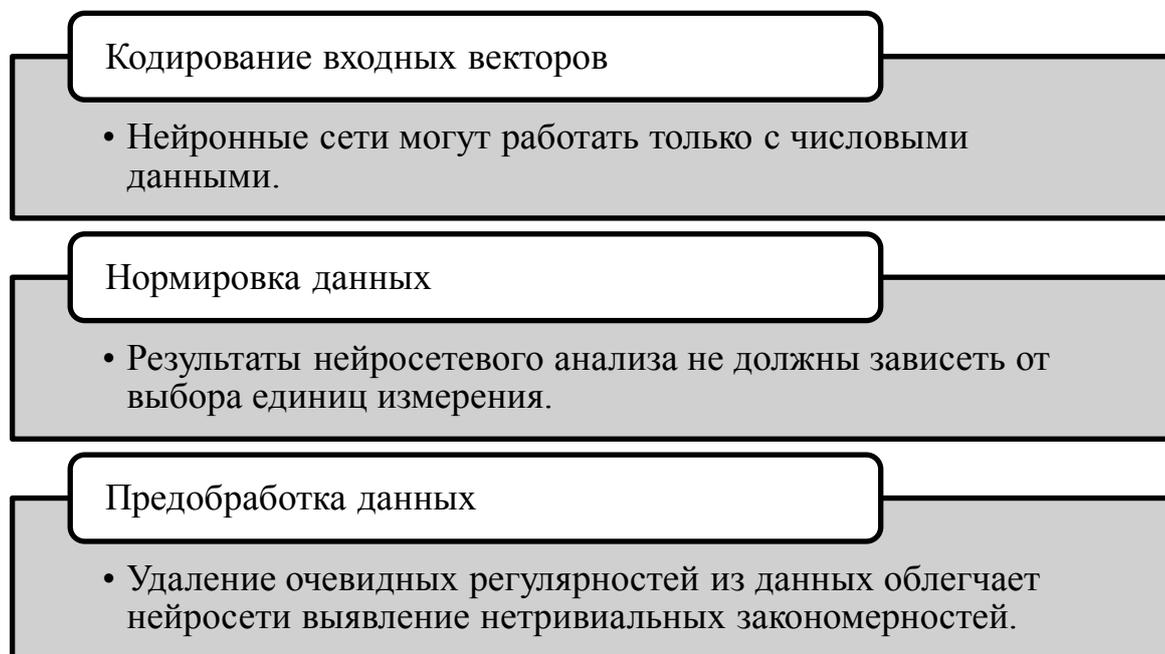


Рисунок 2.11 – Подготовка данных

Для решения задач с помощью нейронных сетей необходима предобработка входных данных, предоставленных ей для обучения. Основными этапами предобработки данных наглядно показаны на рисунке 2.11.

Ключевой возможностью анализа с помощью нейронных сетей является получение прогнозов при минимальном количестве входящих данных. Метод анализа посредством нейронных сетей позволяет снизить количество исходящих (априорных) данных и значений, благодаря чему кардинально снижается размерность вычислений без потери точности конечного результата [77].

Рассмотрим небольшой пример (рисунок 2.12), наглядно демонстрирующий протекание данного процесса: сеть, имеющую 2 входных элемента и 25 выходных.

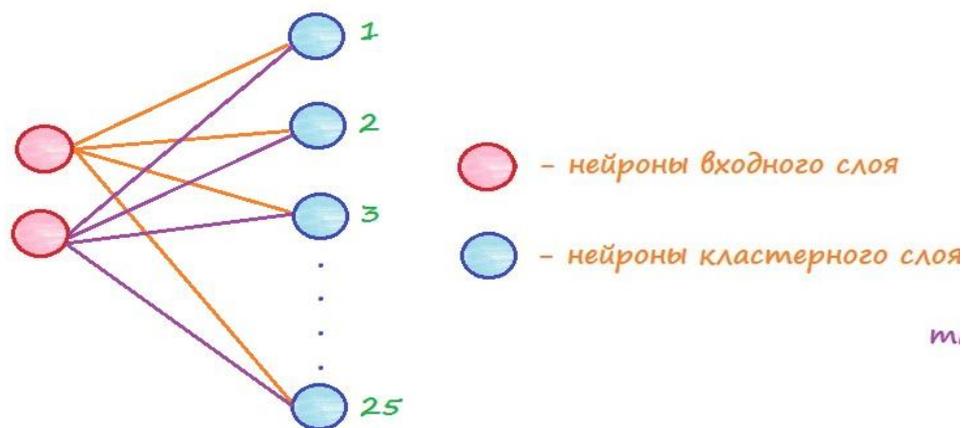


Рисунок 2.12 – Пример обучения нейронов [76]

Зададим для каждого кластера веса связей равными некоторым значениям, близким к 0.5. Весовые значения являются координатами кластеров, а поскольку в данном случае имеется две координаты, то есть двумерное пространство, то можно изобразить все кластеры на рисунке 2.13.

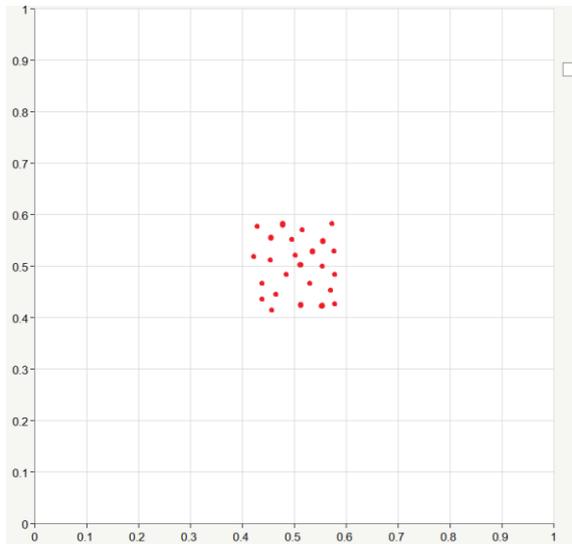


Рисунок 2.13 – Координатами кластеров [76]

Пусть обучающие данные будут сгенерированы случайным образом в диапазоне от 0 до 1 (рисунок 2.14).

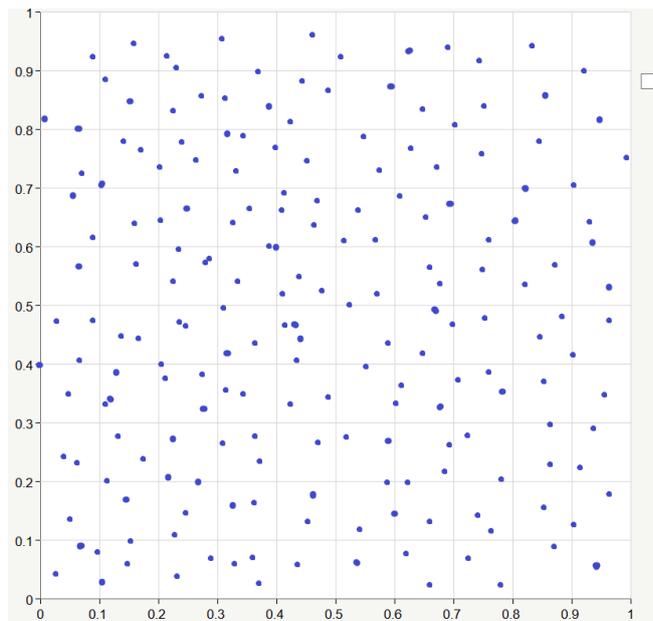


Рисунок 2.14 – Расположение нейронов [76]

«Итак, у нас есть сеть, есть начальные значения коэффициентов связей, есть обучающая последовательность. В отличие от обучения с учителем при обучении сети Кохонена обучающая выборка подается на вход не один, а много раз. Один полный проход обучающей выборки называют эпохой. На рисунке 2.15 представлен возможный вид сети после 20-30 эпох обучения (соединены линиями соседние кластеры)» [76]:

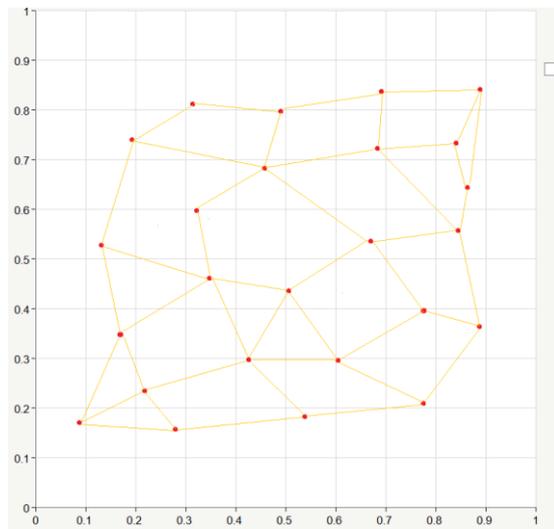


Рисунок 2.15 – Порядок обучения нейронов [76]

Как видите сеть «растягивается». Продолжим обучение, и после 200 эпох сеть может принять следующий вид (рисунок 2.16):

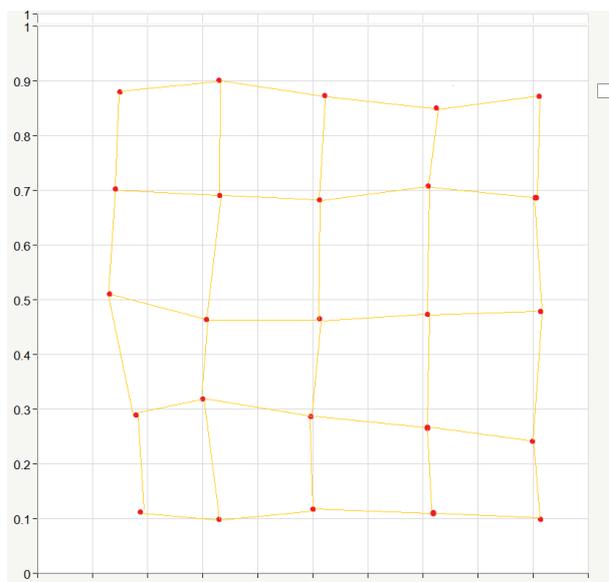


Рисунок 2.16 – Результат обучения нейронов

«В итоге получаем довольно-таки упорядоченное расположение нейронов. Это объясняется тем, что входные элементы берутся случайным образом, и они относительно равномерно распределены в квадрате, соответствующем координатам от 0 до 1. Естественно, на практике вряд ли получится такой идеальный вариант, но суть процесса обучения этот пример описывает очень хорошо). Для достижения «идеальности» при реальном обучении необходимо очень удачно выбрать начальные веса связей, которые задали случайным образом.

На самом деле рассмотренная сеть не очень подходит для решения реальных задач, поскольку в большинстве случаев при использовании карт Кохонена стремятся получить более простую характеристику данных, чем изначальная. То есть число выходных элементов выбирают меньшим, чем число входных признаков.

Существуют специальные программы, которые позволяют моделировать нейронные сети, в частности сети Кохонена. Существует возможность написания собственной программы для решения подобных задач и графического отображения результатов. Ниже приведён наглядный пример работы такой программы и использования её на практике. На рисунке 2.17 представлена сеть, принимающая на вход 20 признаков, а выходные нейроны представляют собой сеть $12*16$ » [76]:

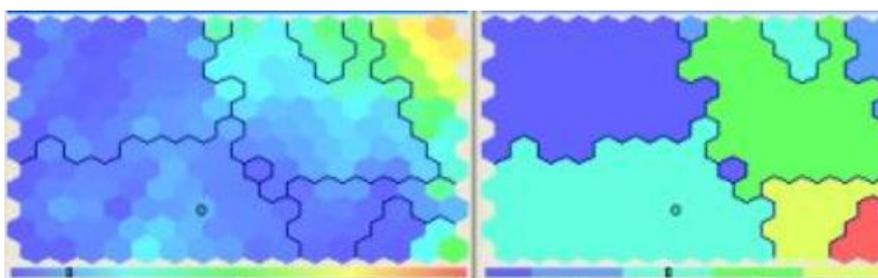


Рисунок 2.17 – Результат построения карт

Левая часть изображения представляет собой входную карту для одного из признаков. Желтый и красный цвета соответствуют максимальным значениям признака, а синий – минимальным. Входные элементы, имеющие значения исследуемого признака близкие к максимальному будут отнесены к кластерам, находящимся в правом верхнем углу. Такие входные карты можно построить для любого из 20 входных признаков.

Правая часть рисунка 2.17 – выходная карта, то есть наша сеть определила, что изначальные кластеры ($12*16$ штук) можно объединить так, как указано на изображении. То есть в итоге получим 7 различных групп, к которым могут быть отнесены подаваемые на вход элементы.

Для начала разберемся, в чем же вообще состоит цель обучения. А все просто – в корректировке весовых коэффициентов связей сети. Одним из самых

типичных способов является управляемое обучение. Для его проведения необходимо иметь набор входных данных, а также соответствующие им выходные данные. Устанавливаем весовые коэффициенты равными некоторым малым величинам. А дальше процесс протекает следующим образом. «Мы подаем на вход сети данные, после чего сеть вычисляет выходное значение. Это значение сравнивается с имеющимся у нас (напоминаю, что для обучения используется готовый набор входных данных, для которых выходной сигнал известен) и в соответствии с разностью между этими значениями корректируем весовые коэффициенты нейронной сети. И эта операция повторяется по кругу много раз. В итоге получим обученную сеть с новыми значениями весовых коэффициентов» [46].

Алгоритм обратного распространения ошибок - этот алгоритм определяет два «потока» в сети. Входные сигналы двигаются в прямом направлении, в результате чего получаем выходной сигнал, из которого рассчитаем значение ошибки. Величина ошибки двигается в обратном направлении, в результате происходит корректировка весовых коэффициентов связей сети.

Итак, для корректировки весовых значений следует использовать дельта-правило. Вот только необходимо определить универсальное правило для вычисления ошибки каждого элемента сети после, собственно, прохождения через элемент (при обратном распространении ошибок).

Большинство ИНС содержат некоторую форму правила обучения, которая изменяет веса связей в соответствии с входными данными. В некотором смысле, искусственные нейронные сети учатся на примере так же, как их биологические образцы.

Несмотря на то, что существует множество различных правил обучения, используемых нейронными сетями, в данном случае рассмотрим одно из самых распространенных – дельта-правило или правило дельты. Оно часто используется наиболее общим классом нейронных сетей с обратным распространением ошибки.

С дельта-правилом, как и с другими типами обратного распространения, обучение представляет собой контролируемый процесс, который происходит с каждым циклом или эпохой (т.е. каждый раз, когда сеть представлена новым шаблоном ввода) посредством прямого потока активации выходов и обратным распространением ошибок корректировки веса. Проще говоря, нейронная сеть изначально делает случайное предположение относительно того, что это может быть, то есть какой результат должен быть на самом деле. Затем она видит, насколько далек ее ответ от фактического, и делает соответствующую корректировку своих весов соединения [71].

Рассмотрим нейронную сеть (рисунок 2.18) и вручную проведем расчеты для прямого и обратного «поточков» в сети.

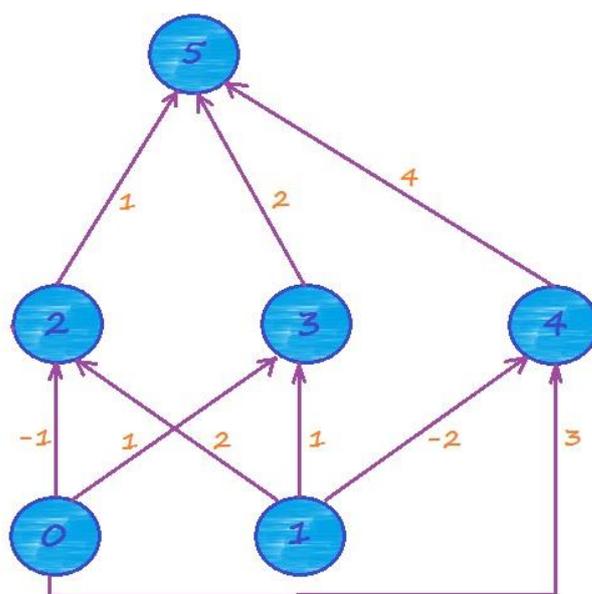


Рисунок 2.18 – Пример реализации принципа

«На вход следует подать образец, пусть это будет (0.2, 0.5). Ожидаемый выход сети – 0.4. Норма обучения пусть будет равна 0.85. Давайте проведем все расчеты поэтапно. В качестве функции активности можно использовать логистическую функцию. Аналогичным образом производим расчеты и для остальных элементов» [76].

Вот краткий пример обучения сети с двумя скрытыми слоями (рисунок 2.19).

Итак, добавляем в нашу сеть два новых элемента (X и Y), которые теперь будут выполнять роль входных. На вход также подаем образец (0.2, 0.5).

Как только нейронная сеть обучена до удовлетворительного уровня, ее можно использовать как аналитический инструмент для других данных. Для этого пользователь больше не задает тренировочные данные и вместо этого допускает сети работать только в режиме прямого распространения. Новые данные поступают на вход сети, где они фильтруются и обрабатываются средними слоями, как при процессе обучения, однако в данной ситуации выход сохраняется и не происходит обратное распространение [34]. Выходной сигнал прямого распространения является предсказанной моделью для данных, которая затем может использоваться для дальнейшего анализа и интерпретации.

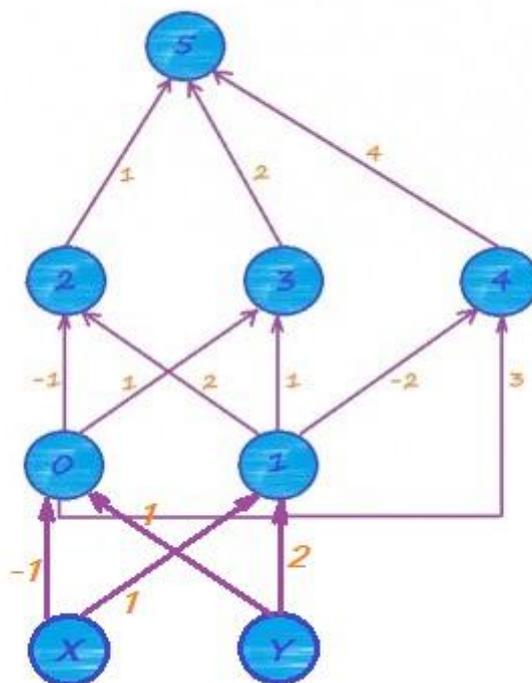


Рисунок 2.19 – Пример построения карт [76]

Также возможно переобучить нейронную сеть, а это означает, что сеть была обучена именно для того, чтобы реагировать только на один тип ввода, что очень похоже на заучивание. Если это произойдет, то обучение остановится, и сеть заучит выборку. В реальных приложениях эта ситуация не

очень полезна, так как для каждого нового вида ввода потребуется отдельная внушительная сеть.

2.5 Выводы по второму разделу

1. Решение задачи обеспечения совершенствования алгоритма управления параметрами системы обнаружения утечек нефти на магистральных нефтепроводах основывается в данном исследовании на теории ТАУ. Введение в систему управления вспомогательного контура управления делает возможным учет индивидуальных особенностей объектов управления (в том числе и управления обнаружением утечек нефти). В свою очередь, это ведет к повышению стабильности работы всей системы. При проектировании вспомогательного контура управления могут появиться только вычислительные вопросы реализации методики управления (алгоритма работы) для контура.

2. В современных условиях в науке и технике существует устойчивая тенденция, связанная с необходимостью решения широкого спектра задач в оптимизационной постановке. Применяемые для этой цели методы весьма разнообразны, но далеко не все из этих задач могут быть решены с использованием традиционных подходов при условии наличия незначительного количества вспомогательной информации, известной априори.

3. Поведенческие метаэвристические методы оптимизации моделируют не эволюцию, а коллективный разум. В основе поведенческих метаэвристических методов оптимизации заложена бионическая идея коллективной адаптации, т.е., механизм распространения информации в «стае», «рое», «косяке», что обусловлено превосходством группового интеллекта над умственными способностями одного отдельного индивидуума. Особое место среди них принадлежит алгоритму оптимизации роем частиц (PSO), что обусловлено возможностью его применения для эффективного решения широкого круга задач оптимизации, в том числе непрерывной, дискретной, комбинаторной и многокритериальной.

4. Посредством процесса, именуемого самоорганизацией, СОКК образует топологическое представление входных анализируемых данных из нейронов, получаемых на выходе. СОКК можно обучить узнавать или находить взаимосвязи между входами и выходами. Алгоритм самоорганизации Кохонена основывается на соревновательном обучении без учителя.

5. Процесс обучения самоорганизующихся карт Кохонена является алгоритмом взаимодействия кластеров внешних слоёв нейросети с её центральными частями и «выигравшим» элементом в сторону обучающего наблюдения.

3 ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

3.1 Создание новой модели нейронной сети Кохонена

3.1.1 Граничный эффект и способы его устранения

«Общие вопросы математического моделирования и идентификации параметров моделей гидравлических систем, в том числе трубопроводов, достаточно хорошо изучены» [51]. Вместе с тем для обнаружения утечек и фактов несанкционированного отбора нефти из нефтепроводов требуется дальнейшее совершенствование методов и систем обнаружения утечек с моделированием в реальном времени процессов распространения волн давления и расхода, вызванных кратковременными возмущениями

На основе рассмотренных аналоговых технологий сбора данных опишем практические возможности реализации разработки интеллектуальной системы сбора данных в условиях трубопровода.

На первом этапе определим основные параметры проектируемой сети и выделим способы их устранения.

В [78] для устранения граничного эффекта предлагается методика, использующая крайние нейроны (дающие граничный эффект) в качестве соседей для других крайних нейронов смежной области.

В рекомендациях по использованию СОКК [79] указано, что используемые для ликвидации граничного эффекта виртуальные нейроны не содержатся в алгоритме, поэтому состояние и размерность сети U_N не претерпевает изменений. Благодаря этому решению, сохраняется один из базовых принципов СОКК, что все и каждый нейрон сети обрабатывается по одному алгоритму. В результате применения такого подхода, асимметрия для всех и каждого нейрона сети находится в узком интервале значений.

Австралийские авторы J. Kennedy, и R.C. Eberhart в работе [68] предлагают следующий способ устранения «граничного эффекта», трансформируя решётку (двумерную карту) в замкнутую поверхность многогранника (икосаэдра, додекаэдра), состоящую из правильных треугольников (рисунок 3.1).

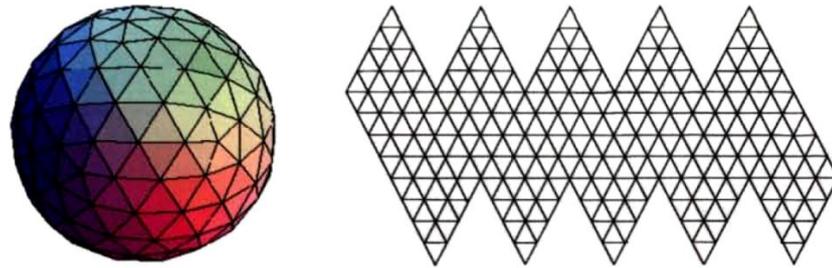


Рисунок 3.1 – Икосаэдр и его развертка

Так как данная технология является сложной в реализации и требует формирования строго симметричной системы нейронов, предложим модель модификации связей между узлами для управления сбора данных об утечках в магистральном трубопроводе.

Решетка классической модели самоорганизующейся нейронной сети Кохонена может иметь плоскую прямоугольную или гексагональную топологию, что отображено на рисунке 3.2.

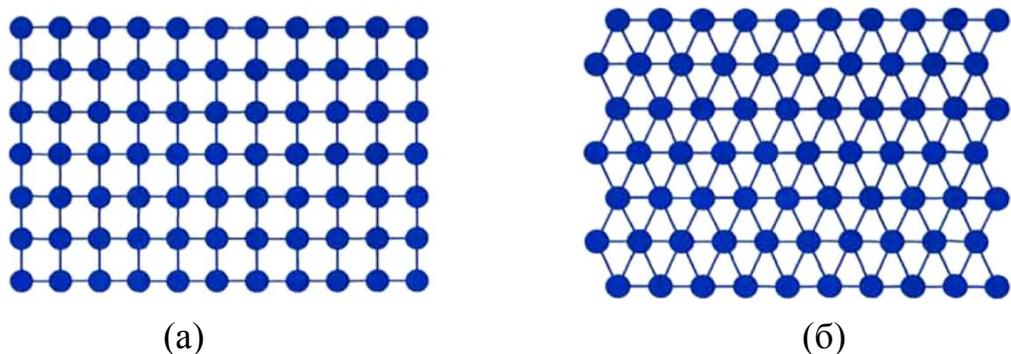


Рисунок 3.2 – Прямоугольная (а) и гексагональная (б) решетки классической модели СОКК

В настоящей работе предлагается следующий метод установки латеральных связей между нейронами в сети и определения размеров топологических областей соседства.

Для каждого нейрона в решетке сети создается список его ближайших соседей. Такими ближайшими соседями для нейрона u_i в радиусе $\sigma = 1$ являются только 4 нейрона (рисунок 3.3), два из которых (u_a и u_c) находятся в том же столбце, но в соседних по вертикали и горизонтали строках, а другие два

нейрона (u_b и u_c) находятся в той же строке, но в соседних слева и справа столбцах от рассматриваемого нейрона u_i .

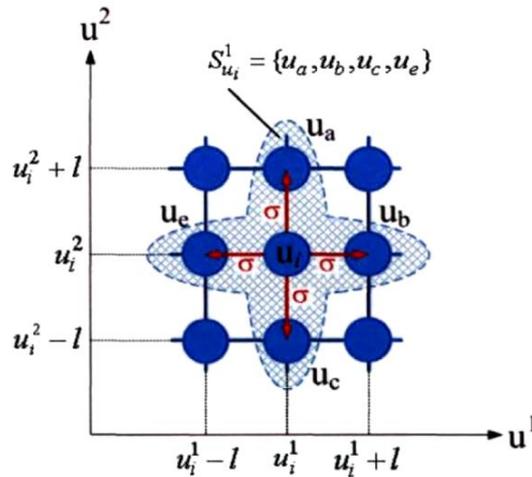


Рисунок 3.3 – Соседи нейрона в радиусе $\sigma = 1$

Таким образом, область соседства радиуса $\sigma = 1$ для каждого нейрона u_i в сети с шагом $l=1$ обозначим как:

$$S_{u_i}^1 = \{ u_j = (u_k^1, u_n^2) \in U_N | u_k^1 \in \{u_i^1 - 1, u_i^1 + 1\}, u_n^2 \in \{u_i^2 - 1, u_i^2 + 1\}, i = 1, \dots, N \} \quad (3.1)$$

В радиус $\sigma = 1$ соседства попадает только сам нейрон u_i , что соответствует значению $l = 0$:

$$S_{u_i}^0 = \{ u_i \in | i = 1, \dots, N \} \quad (3.2)$$

Список ближайших соседей для каждого нейрона задается на стадии инициализации нейронной сети и в процессе обучения не изменяется.

В представленной работе для оптимизации системы идентификации утечек в магистральном трубопроводе предлагается к использованию вариант структуры решетки нейронной сети, которая была названа замкнутой. Путем соединения краев решетки сети с прямоугольной топологией предлагается решать проблему «граничного эффекта» для СОКК. На первом шаге

производится трансформация плоской решетки в цилиндр. При этом соединяются друг с другом ее левый и правый края (рисунок 3.4).

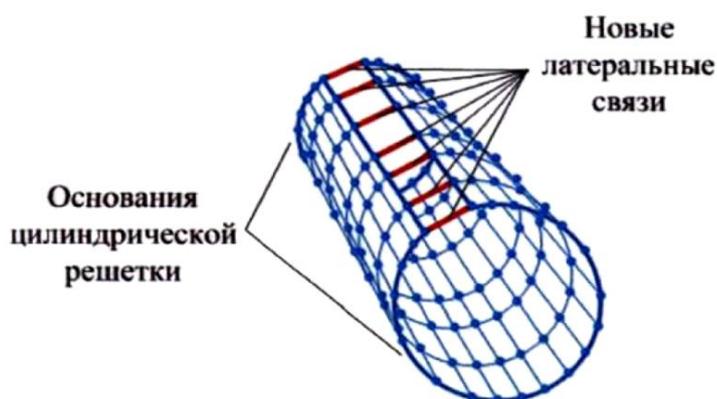


Рисунок 3.4 – Соединение краев решетки сети для образования цилиндрической решетки

На втором шаге необходимо соединить нейроны на образовавшихся основаниях цилиндра. Для этого предлагается две схемы соединения: «Каждый с каждым» (рисунок 3.5) и «Противолежащие» (рисунок 3.6).

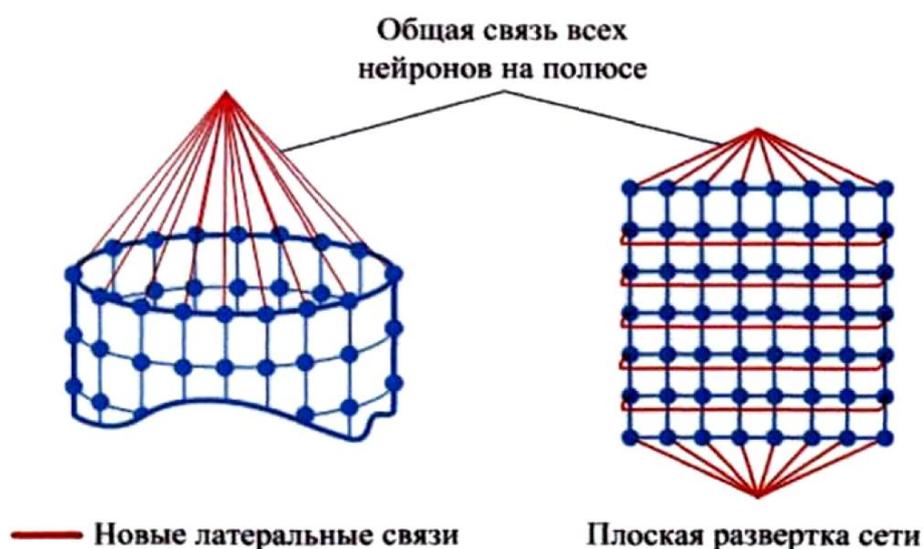
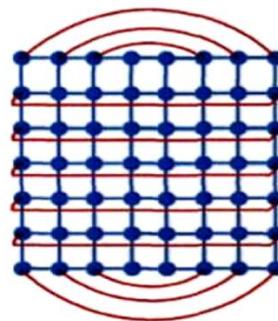
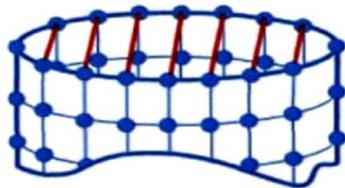


Рисунок 3.5 – Соединение нейронов на основаниях образовавшегося цилиндра замкнутой решетки сети по схеме «Каждый с каждым» [78]

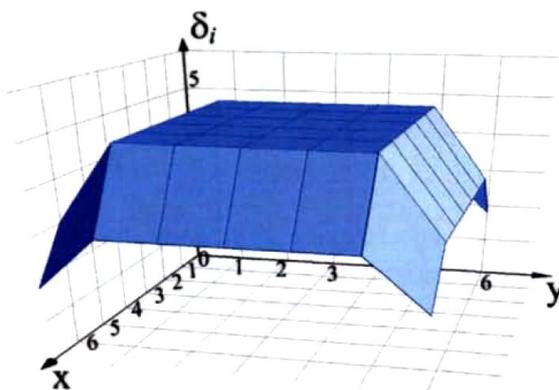


— Новые латеральные связи

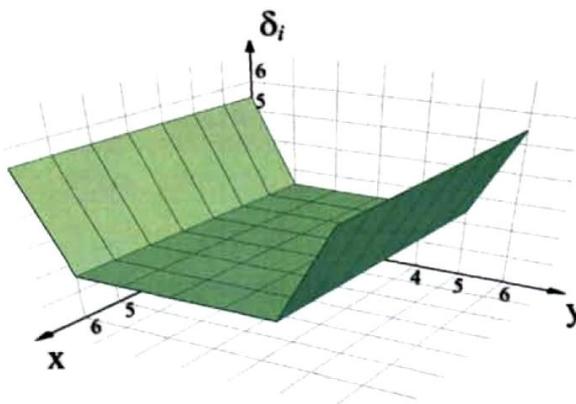
Плоская развертка сети

Рисунок 3.6 – Соединение нейронов на основаниях образовавшегося цилиндра замкнутой решетке сети по схеме «Противолежащие»

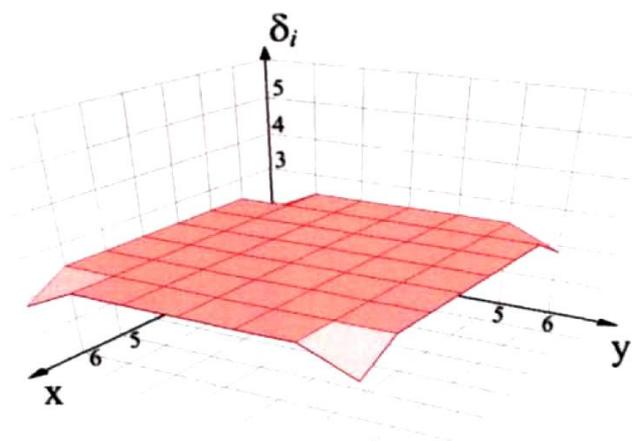
На рисунке 3.7 построены графики величины асимметрии латеральных связей δ_i для рассматриваемых сетей при одной и той же зафиксированной итерации обучения, и радиусе обучения $\sigma = 1$. [78]



(a) Классическая модель



(б) Разработанная модель, схема «Каждый с каждым» [78]



(в) Разработанная модель, схема «Противолежащие» [78]

Рисунок 3.7 – Характеристика симметричности латеральных связей для СОКК
 «Как видно в классической модели СОКК для нейронов на всех границах сети не хватает соседей, поэтому характеристика δ_i убывает по периметру решетки сети. Нейроны же, находящиеся от границы решетки на расстоянии $\sigma > 1$ имеют равные значения характеристики δ_i .»[78].

«Сравнение результатов работы сетей классической и разработанной моделей по критерию ошибки квантования проводилось при разном количестве эпох обучения (10, 30, 50, 100 и 200 эпох). Результаты проведенных исследований представлены на рисунке 3.8»[78].

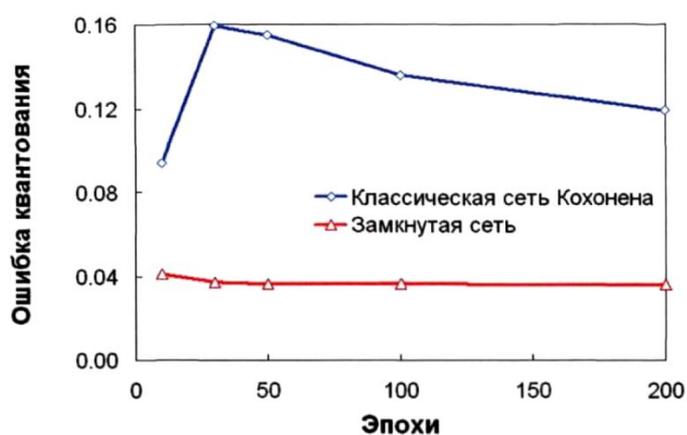


Рисунок 3.8 – График ошибки квантования сетей

Обе схемы замкнутой сети представлены одним графиком модели в целом, потому что по критерию энтропии схемы дают одинаковые результаты.

3.2 Анализ полученных результатов применения новой модели

При проведении большего количества эпох обучения, скорость обучения и радиус соседства принимают небольшие значения, что позволяет производить более тонкую подстройку весов нейронов под входные векторы, а значит – увеличить точность системы обнаружения утечек.

Увеличение точности и качества аппроксимации разработанной сетью входного пространства данных происходит из-за увеличения количества латеральных связей между нейронами и более равномерного распределения по сети векторов входного пространства.

Таким образом, в разработанной модели самоорганизующейся нейронной сети происходит более равномерное распределение входных векторов по нейронам сети по сравнению с классической моделью сети Кохонена.

При реализации осцилляторной модели в нейросетевом базисе [62] ее параметры могут быть идентифицированы путем обучения на основе данных, полученных в результате измерения давления и расходных параметров потоков в нескольких точках нефтепровода.

Предложенный подход для нефтепровода может быть использована для обнаружения утечек и несанкционированных врезок, в частности для оперативного обнаружения фактов кратковременного отбора или пролива нефти с определением его места.

Точность определения параметров утечек зависит от количества осцилляторов, используемых в модели нефтепровода для расчета волны давления, но оно значительно меньше, чем количество узлов в сеточной модели.

Применение модели позволит свести к минимуму время реакции аварийных служб и служб безопасности на подобные факты, что может способствовать сокращению вынужденного простоя нефтепровода и как следствие – значительному уменьшению потерь нефти и снижению экологического ущерба от ее разлива

3.3 Модернизация существующей сети связи магистрального нефтепровода

Как сообщает «Российская газета», уже 6 лет на трубопроводах «Транснефти» внедрялась разработанная инженерами предприятия «ОМЕГА» система обнаружения утечек и контроля активности (СОУиКА). В качестве чувствительного элемента (распределенного датчика и среды для передачи информации одновременно) в ней используется волоконно-оптический кабель, проложенный рядом с трубой. Таким кабелем-детектором оборудовано - а значит, защищено - уже более 5,5 тыс. км отечественных трубопроводов [48].

«Сам этот метод и физическая основа, на которой он построен, широко известны. По акустическим колебаниям рядом с магистралью, вибрациям, смещению грунта, температурным скачкам на поверхности трубы и рядом с ней система мониторинга может дистанционно зафиксировать и распознать то или событие, оценив степень его опасности - реальной и гипотетической. Чтобы система распознавания (идентификации) событий могла работать в автоматическом, самонастраиваемом и самообучаемом режиме, создают сложнейшие математические программы и формируют так называемые акустические библиотеки - сравнительные базы данных с "эталонным" звуковым архивом. Например, сейчас объем обработанной и помещенной в акустическую библиотеку информации достигает уже 80 Терабайт.

О новом этапе таких разработок и рассказали своим зарубежным коллегам на MLSP 2016 наши специалисты. В основе новой разработки - оптоволоконной системы мониторинга трубопроводов (ОСМТ) - все тот же оптоволоконный кабель-датчик. Он укладывается вдоль трассы трубопровода и фиксирует данные по двум каналам: температурному и виброакустическому. Оптоволокно чутко улавливает любые изменения в охранной зоне и передает информацию для анализа в логические модули. Их устанавливают примерно в 50 км друг от друга в специальных блок-контейнерах на пунктах контроля и управления. Логические модули отвечают за обработку сигналов, хранение данных и передачу информации о событиях технологическим и охранным службам.

Главной инновацией системы является подключение к анализу данных искусственных нейронных сетей. Для этого были написаны специальные алгоритмы и программы, а для формирования и обработки данных акустической библиотеки даже были задействованы мощности отечественного суперкомпьютера «Ломоносов» МГУ.

Построенная общими стараниями интеллектуальная система позволяет быстро и с высокой точностью идентифицировать потенциально опасные события на трубопроводе и отсеивать малозначимые, случайные «помехи». Информация со всех логических модулей системы собирается и архивируется на самом высоком уровне - в управляющих диспетчерских пунктах с оборудованными для этого автоматизированными рабочими местами. Всё, что происходит на трубопроводе, отображается на экране диспетчера в режиме реального времени.

Такой искусно созданный «нейроанализатор» не просто способен распознавать рядом с нефтяной или газовой магистралью шаги человека, работу землеройной техники, шлифование, сверление трубы, шумы, сопровождающие утечку нефти, но и самообучаться в процессе мониторинга. Это необходимо, чтобы не спутать, к примеру, стадо диких кабанов, пересекающих трассу нефтепровода, с группой злоумышленников с шанцевым инструментом. А экскаватор или другую землеройную машину с проезжающим вдоль трассы лесовозом или квадроциклом.

Как уверяют создатели, система работоспособна практически в любых геологических и климатических условиях. Она функционирует незаметно для нарушителей, не требует электропитания вдоль трассы трубопровода и практически невосприимчива к магнитным полям и радиации.

При этом сфера применения ОСМТ не ограничивается нефтегазовым сектором. Эта же система при определенной настройке может, например, использоваться для мониторинга железнодорожных и шоссейных магистралей, особенно на лавиноопасных участках. В угольной промышленности она

эффективна для отслеживания опасной концентрации метана в шахтах, а также для обнаружения тлеющих очагов угольного шлама.

Названные и пока что скрытые возможности ОСМТ указывают на возможность ее использования для охраны государственной границы и оперативного анализа аэродромной обстановки. И это, уверяют создатели, далеко не все возможности инновационного контрольно-измерительного комплекса» [80].

Поэтому в данном исследовании будет рассматриваться система оптимизации, предложенная российскими учеными модели на примере нефтепровода «Грушовая».

Площадка «Грушовая», принадлежащая АО «Черномортранснефть» с участком трубопровода Грушовая-Шесхарис оборудована автоматизированной системой сбора данных на основе технологии сбора данных по оптоволоконной системе MEGATRANS – 3L. В рамках данного исследования разрабатывается алгоритм и технология сбора данных для обеспечения защиты от утечек.

Цифровая система передачи Megatrans-3L от компании Компания Кэрриком, ООО, Минске (Беларусь).

Комплект состоит из оборудования окончания линейного тракта (ОЛТ), устанавливаемого на ОУП и линейных регенераторов, устанавливаемых в НУП. В регенераторах возможна организация ответвлений цифровых и аналоговых каналов.

Особенности системы показаны на рисунке 3.9:

При всех достоинствах данной системы она имеет ряд существенных недостатков: возможен перенос спектра только в область более высоких частот, что вызывает уменьшение длины участка регенерации; при асимметричной передаче не обеспечивает 100% совместимость при работе с двухполосными системами; скорость передачи данных ниже требуемой в ТЗ на модернизацию; высокие энергетические затраты; высокие эксплуатационные расходы.

Передача синхронного цифрового потока E1 G.703 по двум физическим парам медного кабеля.



Дополнительный стык Ethernet.



Дополнительный стык RS232.



Двухкабельная или однокабельная схема включения.



До 18 дистанционно-питаемых регенераторов.



Длина регенерационного участка до 26 км (МКСБ 1,2 мм).



Подсистема служебной связи.



Построение сети технологической связи.



Рисунок 3.9 – Особенности системы MEGATRANS-3L

Данные обстоятельства обуславливают необходимость проведения модернизации существующей системы передачи данных. Новая сеть связи будет организована на основе WDM-оборудования с использованием технологии CWDM. В системе CWDM количество длин волн, которые могут параллельно действовать, равно 18. Технология CWDM по сравнению с остальными формами WDM применяет более широкие полосы частот, которые могут содержать некоторое количество диапазонов, типичных для оптических СПД.

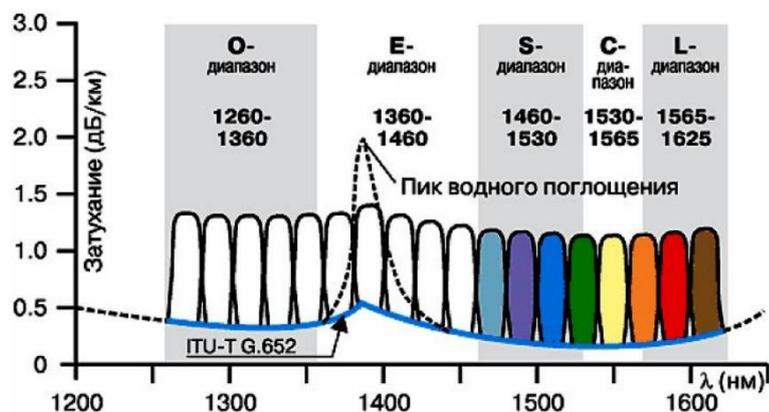


Рисунок 3.10 – Распределение длин волн по диапазонам

В CWDM-системах протяженность волоконно-оптических линий и расходы на проектирование менее значительны, чем при технологии DWDM.

На рисунке 3.10 показан диапазон распределения длин волн [81]. Технология CWDM в настоящий момент времени приобретает огромную популярность, преимущественно в городских и региональных сетях.

«Крупнейшие провайдеры, предоставляющие телекоммуникационные услуги в городах, реализовывают усовершенствование сети и приступают к внедрению системы CWDM, вместо применяемых ранее систем SDH/ATM/IP/FR» [82].

«Системы CWDM позволяют разрешить трудности, связанные с нехваткой пропускной способности при повышении экономической эффективности применения сети и минимизировании капитальных вложений на ее проектирование» [82].

«Устройства CWDM поддерживают разные виды и скорость передачи информации, и имеют все шансы стать связывающим элементом для магистрали и сети доступа» [82].

На основании анализа промышленных систем волнового уплотнения, технических требований к основным узлам аппаратуры WDM, а также соотношения цены и качества выбираем оборудование фирмы Huawei Technologies, хорошо зарекомендовавшей себя на российском рынке.

Оптическая система передачи OptiX BWS 1600G (сертификат № ОС/1-СТ-984) на основе технологии CWDM. Система OptiX BWS 1600G DWDM – разновидность мультисервисного оборудования CWDM большой емкости и большого расстояния передачи. Она была разработана на основе развитых и усовершенствованных технологий.

Система OptiX BWS 1600G сконструирована по модульному принципу.

Основные элементы системы представляют собой блоки с различными функциями. Оборудование можно сконфигурировать путем сочетания функциональных блоков, которые необходимы в данном конкретном случае.

Физическая структура системы OptiX BWS 1600G представляет собой полку (подстатив), в которую вставляются платы. Полки устанавливаются в статив. Один статив может обслуживать до 12 каналов услуг.

Если есть необходимость в использовании 160 каналов услуг, то этого можно достичь за счет расширения числа стативов (зависит от конкретной ситуации).

Основным функциональным блоком системы OptiX BWS 1600G является монтажная плата. Сочетая различные платы можно сконфигурировать следующие виды оборудования: оптический мультиплексор ввода/вывода (OADM), оптический терминальный мультиплексор/демультиплексор (OTM), оптический линейный усилитель (OLA) и регенератор (REG). Стативы и подстативы оснащены специальными методами защиты для обеспечения EMC (электромагнитная совместимость).

Полученные данные анализа существующей системы сбора данных по площадке «Грушовая», принадлежащая АО «Черномортранснефть» с участком трубопровода Грушовая-Шесхарис показала, что для организации подключений маршрутизаторов и АРМов узлов используются цифровые каналы E1 и выделенные физические линии.

В данной работе предлагается трансформировать физическую систему сбора данных в нейронную сеть (интеллектуальную сеть, способную к самообучению). Оборудуются узлы и к этим узлам подключаются ОУ АРМов (как отдельно стоящие, так и в составе ЛВС). Концентраторы подключаются в СПД TCP/IP через ЛВС узла, где они расположены. АРМы TCP/IP подключаются через асинхронные порты маршрутизаторов.

В проекте специфицировано следующее оборудование: маршрутизаторы, коммутаторы, концентраторы фирмы Cisco Systems; модемное оборудование фирм Tainet Communications и Zyxel; источники бесперебойного питания (ИБП) фирмы APC; монтажные шкафы Rittal и коммутационное оборудование.

Схема организации сети передачи данных для рассматриваемого участка магистрального нефтепровода конструируется в зависимости от сложности могут использоваться только определенные магистральные маршрутизаторы. Автор отмечает, что схема связи конструируется индивидуально для каждого конкретного участка.

В качестве опорных маршрутизаторов выбираем модели Cisco 7206, Cisco 3845 и Cisco 3825. Для промежуточных пунктов выбираем модель маршрутизатора Cisco 2610. В пункте связи необходим маршрутизатор Cisco 3825, к которому подключаются отделенческие связи по цифровым каналам сети SDH и PDH.

Активное коммутационное, монтажное и электротехническое оборудование СПД размещено в монтажном шкафу.

В данном шкафу установлены: маршрутизатор Cisco 3825 для организации отделенческой связи по ВОЛС с другими пунктами, а также для организации связи.

Все линейные подразделения подключены с помощью модемов Tainet 1320, работающих по физической линии.

Для подключения некоторых ЛВС линейных предприятий посредством технологии HDSL используется модемный коммутатор Zyxel IES-1000 с абонентской стороны, при этом используются модемы Zyxel Prestige 791R.

Для организации связи между устройствами шкафа и подключения местных абонентов используется коммутатор Cisco 2960.

Бесперебойное электропитание оборудования шкафа обеспечивается блоком бесперебойного питания APC Smart-UPS 2200.

Маршрутизатор Cisco 3825 осуществляет маршрутизацию пакетов информации. В маршрутизаторе установлены модули для работы с внешними устройствами: модемами, оптическими мультиплексорами.

Модемы расположены в корзине Tainet TRS-32. Это стандартный модемный пулл на 16 однопортовых модемов с дисплейным пультом управления. Посредством порта Ethernet корзина соединена с сетью ЛВС, что позволяет удаленно управлять настройками, установленных в ней модемов.

Все устройства, находящиеся в стойке связаны друг с другом по Ethernet через коммутатор локальной сети Cisco 2960 на 24 порта. Первые 3 порта зарезервированы для аппаратуры, находящейся в шкафу СПД, остальные порты – для подключения других абонентов в здании, где установлен шкаф ПУ СПД.

Напряжение питания на все оборудование подается от источника бесперебойного питания APS Smart-UPS 2200 через блок розеток по силовому кабелю.

Источник бесперебойного питания подключается к однофазному напряжению 220 В.

Для принудительного охлаждения используется вентиляционная панель с тремя вентиляторами, питаемая от сети 220В через блок розеток.

Линейные выходы модемов соединяются витой парой с абонентским кроссом к соответствующим абонентам.

Для подключения к маршрутизатору потоков E1 используются модуль VWIC-2MTF, который соединяется с мультиплексором UTP кабелем. Модемы Tainet работают с маршрутизатором по протоколу V.35.

Для подключения модемов к маршрутизатору Cisco 3825 используются модули последовательного интерфейса WIC-2T. Коммутатор Cisco 2960 при помощи коммуникационного кабеля «витая пара» соединяется со следующими устройствами:

- порт 1 с портом Ethernet маршрутизатора Cisco 3825;
- порт 2 с портом Ethernet управляющей платы Tainet TRS-32;
- порт 3 с портом Ethernet модемным коммутатором Zyxel.

Активное оборудование размещается в монтажном шкафу Rittal (43U) 800x800x2000 с необходимым коммутационным и электротехническим оборудованием.

В нижней части монтажного шкафа располагается источник бесперебойного питания APC Smart-UPS 2200. Над ним крепится блок розеток.

Выше модемный коммутатор Zyxel IES-1000 и полка для перспективного оборудования. Над ним устанавливаем коммутатор и маршрутизатор Cisco. Над маршрутизатором устанавливаем модемную корзину Tainet.

Соединительные и силовые кабели располагаем с тыльной стороны, установленного в монтажных шкафах оборудования.

В общих монтажных шкафах устанавливается панель с тремя вентиляторами для обеспечения принудительного охлаждения находящегося там оборудования. ПЭВМ АРМ оснащены сетевым адаптером для соединения по кабелю «витая пара» UTP 5 категории с коммутатором или концентратором со скоростью 100 Мбит/с.

Так как оптический кабель будет прокладываться в грунте вдоль нефтепровода, то будет использоваться оптический кабель типа ОКЛК, внешний вид которого представлен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Внешний вид оптического кабеля типа ОКЛК

Оптический кабель типа ОКЛК применяется для всех типов грунтов для любых климатических и гидрологических условий. Выдерживает перепады температуры от -60 до + 100°C, выдерживает деформации вечной мерзлоты и является универсальным решением для организации высокоскоростной связи на дальних расстояниях [83]. Его преимущества: минимальный вес и диаметр; высокая стойкость к воздействию растягивающих нагрузок; высокая молниестойкость; надежная защита от повреждения грызунами; низкая температура прокладки и эксплуатации; удобство прокладки и монтажа; большой срок службы.

Параметры эксплуатации для оптического кабеля типа ОКЛК представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры эксплуатации кабеля типа ОКЛК

Нормальное значение	
Температура эксплуатации	от -60°С до +50°С
Минимальный радиус изгиба	не менее 20 диаметров кабеля
Минимальная температура прокладки	-10°С
Температура транспортировки и хранения	от -60°С до +50°С
Срок службы	30 лет
Срок гарантийной эксплуатации	3 года
Минимальный радиус изгиба оптических волокон	не менее 3 мм (в течение 10 минут)
Строительная длина	до 6 км

Для организации связи на проектируемом участке внутризоновой сети необходимо использовать 1 рабочее и 1 резервное оптические волокна по рекомендации G.652. Также принимаем во внимание письмо из ОАО «Связьинвест» №2724 руководителям региональных филиалов о необходимости использования ВОК с числом волокон не менее 20 (из них 4 со смещенной ненулевой дисперсией по рекомендации G.655).

Таким образом, в оптическом кабеле будет 16 оптических волокон по рекомендации G.652 (Corning®SMF-28e+™) и 4 оптических волокна по рекомендации G.655 (Corning® LEAF®). Основные технические характеристики этих волокон представлены на таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные технические параметры оптических волокон

Параметры	Марка ОВ	
	SMF28E+	LEAF
Рабочая длина волны	1310...1625	1550, 1625
Коэффициент затухания, дБ/км, не более		
На длине волны 1310 нм	0,36	-
На длине волны 1383 нм	0,34	-
На длине волны 1550 нм	0,22	0,21
На длине волны 1625 нм	0,24	0,25
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм·км		
В интервале волн (1285 – 1330) нм	≤3,5	-
В интервале волн (1330 – 1565) нм	≤18	2,0...6,0
В интервале волн (1565 – 1625) нм	-	4,5...1322
Поляризационная модовая дисперсия, пс/нм·км, не более		
Индивидуального волокна	0,2	0,1
Линии (20 соединительных волокон)	0,06	0,04

Таблица 3.3 – Основные технические параметры кабеля типа ОКЛК

Количество ОВ в кабеле	Диаметр кабеля, мм	Вес кабеля, кг/км	Раздавливающая нагрузка, Н/10 см, не менее	Растягивающая нагрузка, Н, не менее	Радиус изгиба, мм Статический / динамический
20	13,1	260	7000	400	197/262

Таким образом, обозначение данного типа кабеля будет следующим:

ОКЛК-01-4-20-10/125-0,36/0,22(-/0,21)-3,5/18(-/2..6)-7,0.

В скобках указывается характеристики оптических волокон по рекомендации G.655. Далее в работе будет описан выбор внутриобъектовых волоконно-оптических кабелей.

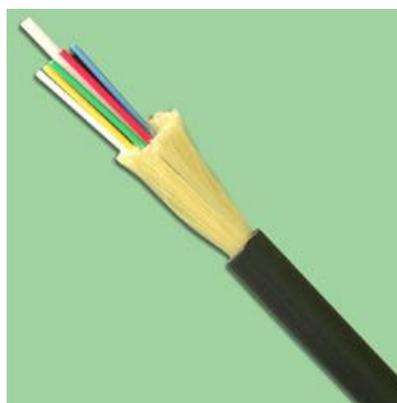
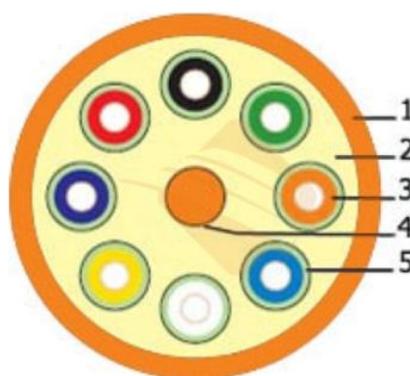


Рисунок 3.12 – Внешний вид волоконно-оптического кабеля [84]



1 – внешняя оболочка, 2 – упрочняющие нити, 3 – оптическое волокно, 4 – силовой элемент, 5 – буферное покрытие

Рисунок 3.13 – Структура волоконно-оптического кабеля [84].

В качестве внутриобъектового волоконно-оптического кабеля был выбран кабель 95M799M08B одномодовый 8*9/125, MTD, FR-PVC, усиленный. Данный оптоволоконный кабель Teldor предназначен для внутренней прокладки. Внешний вид кабеля 95M799M08B представлен на рисунке 3.12, а его структура – на рисунке 3.13.

Основные характеристики кабеля: тип кабеля – волоконно-оптический; тип оболочки – FR-PVC; среда применения – внутренний; количество волокон – 8; тип волокна (SM/M): одномодовое SM 9/125 (OS1, OS2); тип защиты волокон – Tight buffer. Кабель соответствует стандартам EIA/TIA 568–A, ISO/IEC 11801. Оптические характеристики согласно ISO/IEC 11801. Тест огнестойкости – IEC 60332-3.

Для подтверждения работоспособности разработанной схемы проведем расчет ее основных характеристик.

3.4 Расчет основных характеристик новой сети связи

Согласно рекомендации МСЭ-Т G.692, системы WDM имеют определённые стандартизованные конфигурации и оптические интерфейсы. Рекомендации по размещению пролётов разработаны для четырех, восьми, шестнадцати, тридцати двух и более канальных ВОСП-WDM, при скоростях передачи в каналах, соответствующих STM-4, STM-16, STM-64 [85].

Длина проектируемой трассы ВОЛП составляет 360 км. Секция может состоять из трех регенерационных участков длиной до 90км. Максимальная длина такой секции будет равно 400 км. Длина трассы $L_{тр.} = 360$ км. Длина участка $L_{п} = 360/4 = 90$ км. Таким образом, главный оптический тракт будет содержать три линейных усилителя, каждый из которых установлен на расстоянии 90 км от конечных пунктов и от другого линейного усилителя. Используемое оптическое волокно имеет затухание 0,21 дБ, значит, затухания регенерационных участков равно:

$$\alpha_{пр.1} = \alpha_{пр.2} = \alpha_{каб} L_{пр} = 0,21 \cdot 90 = 16,8 \text{ дБ} \quad (3.3)$$

Для расчета диаграммы уровней километрическое затухание в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.692 принято равным 0,275 дБ/км.

Таким образом затухание участков составит:

$$\alpha_{\text{пр.1}} = \alpha_{\text{пр.2}} = 0,275 * 90 = 22 \text{ дБ.} \quad (3.4)$$

Максимальная мощность в оптическом канале ограничивается возможностью возникновения нелинейных явлений в оптическом волокне и лазерной безопасностью.

Основополагающим требованием к системам цифровой передачи данных является её выносливость, надёжность в условиях воздействия внешних и внутренних воздействий [86].

При этом надёжность проектируемой сети связи в определенной степени определяет уровень промышленной безопасности на магистральном нефтепроводе в целом.

Интенсивность отказов ОК за 1 час на длине трассы ВОЛП L:

$$\lambda_{\text{ок}} = \frac{\mu \cdot L}{8760 \cdot 100}, \quad (3.5)$$

где L – длина проектируемой ВОЛП;

8760 – количество часов в году;

100 – длина линии, для которой задана плотность отказов.

Таким образом, интенсивность отказов ОК за 1 час на длине трассы ВОЛП L равна:

$$\lambda_{\text{ок}} = \frac{0,34 \cdot 360}{8760 \cdot 100} = 0,00019057.$$

При существующей на эксплуатации стратегии восстановления, начинающего с момента обнаружения отказа (аварии), коэффициент простоя определяется по формуле 3.6:

$$K_{\Pi}^a = \frac{\lambda_{OK} \cdot T_B}{1 + \lambda_{OK} \cdot T_B}, \quad (3.6)$$

где T_B – время восстановления ($T_B = 5,2$ ч.).

$$\text{Тогда коэффициент простоя равен: } K_{\Pi}^a = \frac{0,00019057 \cdot 5,2}{1 + 0,00019057 \cdot 5,2} = 0,00099.$$

Коэффициент готовности определяется по формуле 3.7:

$$K_{\Gamma} = 1 - K_{\Pi}. \quad (3.7)$$

Коэффициент готовности равен (формула 3.8):

$$K_{\Gamma} = 1 - K_{\Pi} = 1 - 0,00099 = 0,99901. \quad (3.8)$$

Таким образом, рассчитанный коэффициент готовности удовлетворяет норме ($K_{\Gamma} > 0,985$). При длине трассы L не равным L_M среднее время между отказами определяется по формуле 3.9:

$$T_o L = T_o \cdot \frac{L_M}{L}, \quad (3.9)$$

где T_o – время между отказами; L_M – максимальная протяженность для внутризонавой ВОЛП; L – Протяженность проектируемой ВОЛП.

Тогда среднее время между отказами равно (формула 3.9):

$$T_o L = 8760 \cdot \frac{1400}{360} = 33508,8 \text{ ч.}$$

Результаты расчета интенсивности отказов, коэффициента простоя, коэффициента готовности и среднего времени между отказами позволяют сделать вывод, что проектируемая ВОЛП является надежной, что повышает общий уровень промышленной безопасности на магистральном нефтепроводе. Такая нейросетевая модель может достаточно точно описать зависимость снижения давления, вызванное утечкой, от расхода и местоположения утечки.

3.5 Выбор оборудования для организации системы обнаружения утечек нефти

«Самым перспективным в разработке современных систем диагностики является использование штатных приборов систем телемеханики и автоматики при их создании. Это решение выгодно с экономической точки зрения, так как установка в систему дополнительных датчиков приводит к увеличению затрат на запуск и обслуживание данных систем» [54].

«Для создания автоматизированной СОУ следует рассмотреть проблемы систем телемеханики, влияющие на такие характеристики результата как достоверность и оперативность» [54].

«В настоящее время системы телемеханики получили широкое применение в производственных отраслях, где важно централизованное управление территориально удалёнными системами. Главной их особенностью является наличие устройств, которые обеспечивают передачу информации на значительные расстояния. При этом нужно, чтобы эта информация с территориально разобщённых элементов энергосистем в условиях наличия помех передавалась в как можно менее искажённом виде» [54].

«В процессе передачи информации в телемеханике сталкиваются со следующего рода проблемами:

1. Эффективностью, то есть нахождением лучшего способа использования линии связи и аппаратуры в случае передачи большой информации.
2. Достоверностью результата, то есть передачей информации с минимальными искажениями в условиях помех. Для ее достижения должно быть обеспечено синхронное поступление измерений.
3. Экономичностью, то есть построением дешевых и одновременно простых устройств телемеханики, которые передают наибольшее количество информации при наименьших затратах.
4. Быстротой передачи информации от объекта на верхний уровень» [54].

«Последняя проблема зависит от наличия каналов, используемых для передачи информации с необходимыми характеристиками. Особо остро обстоит данная проблема в случае передачи информации от объектов,

расположенных на большом удалении. При увеличении частоты или скорости передачи информации возникает явление, называемое «забиванием канала», или же полное прекращение передачи информации» [54].

В связи с этим комплекс технических средств должен быть работоспособным на различных каналах связи – от проводных до спутниковых.

«Немаловажное значение в системах сбора информации представляет протокол обмена информации, который должен быть способен передавать большие объемы информации без задержек. Для разрабатываемой системы не может быть использован протокол Modbus, так как в системах с большим числом точек сбора информации увеличивается время, необходимое для опроса датчиков и доставки информации» [54].

«Системы телеметрии при помощи RS-232 и RS-485 интерфейсов по различным протоколам осуществляют опрос широко применяемых интеллектуальных датчиков. Стоит отметить, что контроллеры должны иметь и возможность опроса датчиков со стандартными токовыми выходами» [87].

«Требования, предъявляемые к системе сбора данных, можно сформулировать следующим образом: сбор информации по различным интерфейсам как с интеллектуальных датчиков, так и с датчиков со стандартным токовым сигналом; синхронизация времени на контроллерах; гарантированное время доставки информации от объектов; работа на каналах связи разных типов; открытая архитектура при обмене информации с внешними устройствами и системами; масштабируемость и гибкость при построении и наращивании системы» [87].

«В России на рынке телемеханизации продуктопроводов (нефти, газа и аммиака) благодаря высокой надежности, открытости и простоте настройки широкое распространение получила система сбора данных и диспетчерского управления «ПТК СИРИУС» [54].

«Для «ПТК СИРИУС» характерны следующие свойства:

- дистанционное управление с ПЭВМ подпорными и магистральными агрегатами, деблокировкой защит, задвижками и вспомогательными системами НПС;
- задействованность каналов телесигнализации (ТС), телеизмерений (ТИ), апертуры по ТИ для сбора данных о состоянии задвижек, насосных агрегатов, вспомогательных систем, давлений в нефтепроводах, мощностей агрегатов и др.;
- наличие встроенных программируемых модемов для обеспечения надежной связи по разным видам оборудования для связи;
- наличие технических и программных средств для вывода состояний технологических объектов контроля и управления на диспетчерские щиты и экранные мнемосхемы;
- возможность работы устройств без обдува или подогрева в температурном диапазоне от -40 до +70°C;
- удаленное управление режимом работы контроллеров;
- наличие самовосстанавливающихся защит, по цепям ТС, ТИ, каналам связи» [54].

Датчики для проектируемой системы идентификации утечек. Требуется установка в начале и в конце рассматриваемого участка датчиков давления и расходомеров с цифровым или токовым выходом, необходимым для подключения к системе телеметрии. К первичным датчикам, от которых зависит точность результата системы, предъявляются определенные требования.

Так, точность измерений по температуре должна составлять от 0,3 до 0,5 градуса. Класс точности измерений датчиков давления должен быть 0,1, а датчиков расхода – 1,0.

3.6 Разработка алгоритма обработки данных системы обнаружения утечек нефти

Основной проблемой при создании СОУ является нахождение оптимального закона управления.

Оптимальные управляющие воздействия можно сформировать только лишь после проведения идентификации рассматриваемого объекта [88, 89].

Функционал вида (формула 3.10) определяет критерий оптимизации.

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{t_1} f_0(x, u) dt \quad (3.10)$$

В выражении (3.11) подынтегральная функция $f_0(x, u)$ является непрерывной по всем переменным, а также обладает непрерывными частными производными по аргументам, определяющим состояние рассматриваемого объекта x_i ($i=1, 2, \dots, n$), u – управляющее воздействие.

При синтезе оптимальных автоматических систем используют разнообразные критерии оптимизации. Они напрямую зависят от подынтегральной функции $f_0(x, u)$ выражения (3.11). В данном случае подынтегральная функция выражения (3.11) имеет вид квадратичной формы состояния рассматриваемого объекта и его управляющих воздействий [90].

В некоторых случаях функционал (3.10) также включает в себя слагаемое, учитывающее конечное состояние системы. Но данное обстоятельство на порядок усложняет синтез такой системы. Еще одним критерием, который часто используется на практике, можно назвать критерий оптимальности по быстродействию. При этом $f_0(x, u) \equiv 1$

Тогда,

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{t_1} dt = t_1 - t_2 \quad (3.11)$$

Квадратичный критерий вносит определенные сложности в решение поставленной задачи.

Для реализации системы оптимального автоматического управления с учетом критерия оптимальности по быстродействию используются методы динамического программирования и принцип максимума Понтрягина.

Основными недостатками данных методов являются:

- усложнение математической модели;
- повышение требований к вычислительным системам (память, время).

Для решения простых задач, в которых фигурируют объекты 2-3-го порядка, можно использовать аналитическое решение.

В настоящее время свое развитие теория оптимального быстродействия обрела в качестве конечно-временных вариаций предельного быстродействия. В данном направлении также применяются критерий оптимальности по быстродействию, но вид его закона управления другой. Простота структуры подынтегральных функций является отличительной особенностью данного метода. На базе этого реализован метод варьирования свободных функционалов. Данный метод служит для решения прикладных задач при синтезе конечно-временных регуляторов.

Вид вариации функционалов отличает ПКВВ (принцип конечно-временных вариаций) от других интегральных принципов. Варьирование функционалов в ПКВВ происходит вследствие того, что пределы интегрирования подвергаются изменениям. При этом в других вариациях интегрального типа для реализации варьирования функционалов используют модификацию подынтегральной функции.

Основные достоинства принципа конечно-временных вариаций:

- повышение качества оптимального управления;
- снижение уровня сложности проектирования систем управления;
- повышение скорости перевода из начального состояния в конечное;
- оптимизация демпфирования по быстродействию.

Для определенных систем технического типа существует задача, которая направлена на отработку необходимого режима и перехода из одного

фиксированного технологического состояния в другое (в зависимости от возмущающего воздействия).

При этом перевод между различными технологическими режимами довольно часто должен быть оптимален по быстродействию.

Для реализации указанной цели необходимо применять методы, направленные на повышение быстродействия системы. Метод варьирования свободных функционалов является одним из методов, на основании которого можно решить задачу быстродействия. Систему конечно-временных функционалов можно записать в следующем виде формулы 3.12:

$$\begin{aligned}
 J_{1KV} &= \int_{t_n-t_1}^{t_n} (k_1 \cdot x_{\alpha 11}(t)) dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} (k_2 \cdot x_{\alpha 11}) dt + \\
 &+ \int_{t_n-t_3}^{t_n-t_2} k_1 \cdot x_{\alpha 11} dt + \dots + \int_0^{t_n-t_{n-1}} k_2 \cdot x_{\alpha 11} dt \\
 J_{2KV} &= \int_{t_n-t_{n-1}}^{t_n} k_1 \cdot x_{\alpha 12} t dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} k_2 + x_{\alpha 12} dt + \\
 &+ \int_{t_n-t_3}^{t_n-t_2} k_1 \cdot x_{\alpha 12} t dt + \int_0^{t_n-t_{n-1}} k_2 + x_{\alpha 12} dt \\
 &\dots \dots \dots \\
 J_{nKV} &= \int_{t_n-t_3}^{t_n} (k_1 \cdot x_{\alpha 1n}(t)) dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} (k_2 \cdot x_{\alpha 1n}) dt \\
 &+ \int_{t_n-t_3}^{t_n-t_2} k_1 \cdot x_{\alpha 1n} dt + \dots + \int_0^{t_n-t_{n-1}} k_2 \cdot x_{\alpha 1n} dt \\
 &k_1 = \frac{U_M}{U_n}, \quad k_2 = \frac{U_m}{U_n}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Для решения этой задачи необходимо ввести следующий функционал:

$$J = KB\Phi - HZ\Phi, \tag{3.13}$$

где KBΦ – система конечно-временных функционалов;

HЗΦ – система нормально-заданных функционалов;

В (3.14) размерность вектора $J (nx1)$

В данной ситуации при помощи варьирования времени можно решить задачу $J = 0$, а не минимизации J . В развернутом виде это выглядит следующим образом (система уравнений 3.14):

$$\begin{aligned}
& \int_{t_n-t_1}^{t_n} k_1 \cdot x_{a11}(t) dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} k_2 \cdot x_{a11}(t) dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} k_1 \cdot x_{a11}(t) dt + \\
& \quad + \dots + \int_0^{t_n+t_{n-1}} k_2 \cdot x_{a11}(t) dt = \int_0^{\infty} x_{a11}(t) dt \\
& \int_{t_n-t_{n-1}}^{t_n} k_1 \cdot x_{a12}(t) dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} k_2 \cdot x_{a12}(t) dt + \int_{t_n-t_3}^{t_n-t_2} k_1 \cdot x_{a12}(t) dt + \\
& \quad + \dots + \int_0^{t_n+t_{n-1}} k_2 \cdot x_{a12}(t) dt = \int_0^{\infty} x_{a12}(t) dt \\
& \quad \dots \dots \dots \\
& \int_{t_n-t_1}^{t_n} k_1 \cdot x_{a1n}(t) dt + \int_{t_n-t_2}^{t_n-t_1} k_2 \cdot x_{a1n}(t) dt + \int_{t_n-t_3}^{t_n-t_2} k_1 \cdot x_{a1n}(t) dt + \\
& \quad + \dots + \int_0^{t_n+t_{n-1}} k_2 \cdot x_{a1n}(t) dt = \int_0^{\infty} x_{a1n}(t) dt
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{U_M}{U_n} \\
k_2 &= \frac{U_m}{U_n}
\end{aligned}$$

Решая данную систему уравнений, можно определить моменты переключения управления t_1, t_2, \dots, t_n .

В системе (3.14) число уравнений совпадает с количеством неизвестных параметров, что позволяет сделать вывод о возможности решения данной системы.

Состояние системы можно представить в форме Коши (3.15):

$$X(t) = AX(t) + Bu(t) \tag{3.15}$$

Также достаточно широкое распространение получили методы параметрической оптимизации.

Особенностью реализации системы автоматического управления параметрами СОУ являются предъявляемые требования по качеству СОУ.

Если происходит повышение требований к показателям качества СОУ, то возрастает количество проблем, которые напрямую связаны с проектированием и настройкой системы автоматического регулирования.

Чтобы решить данные проблемы, необходимо использовать алгоритмическое обеспечение системы управления, которое будет значительно отличаться от уже имеющегося.

При этом понадобится применение исполнительных регуляторов, которые будут иметь более высокий класс. Использование алгоритмического обеспечения не принесет планируемых результатов, если в наличие не окажется необходимого контролирующего и исполнительного оборудования.

Данное направление выбрано в связи с тем, что любая математическая модель СОУ (или же участка магистрального нефтепровода) в любом случае является только приближенным описанием системы, и поведение реальной системы в полной мере отразить не в состоянии.

По этой причине задавать параметры процесса управления необходимо с использованием определенного алгоритма.

Пусть качественные характеристики СОУ описываются с помощью следующей математической модели:

$$D = \Psi (S, W) \quad (3.16)$$

где D – вектор значений качественных характеристик СОУ;

S – вектор значений параметров управления системой;

W – вектор параметров окружающей среды.

Размерности векторов D , S могут отличаться в зависимости от СОУ и определяются имеющимися контролирующими и измерительными приборами.

Вектор W необходим для учета параметров внешней среды, которые не подлежат контролю, но подлежат измерению. На вектор S налагаются ограничения, которые основаны на физических особенностях процесса, описывающиеся следующим неравенством:

$$\Phi(S) \leq 0. \quad (3.17)$$

Выбор параметров процесса управления (регулирования) основан на использовании метода поиска. Данный метод основан на использовании итерационной процедуры. Эта процедура может быть описана алгоритмом следующего вида:

1. Необходимо задать начальное приближение параметров, описывающих процесс управления COY S_0 и измерить характеристики окружающей среды W

2. Необходимо сгенерировать приращения параметров, описывающих процесс управления COY ΔS_i , при этом надо учитывать физические ограничения, накладываемые на значения параметров (3.18), $S_{i+1} = S_i + \Delta S_i$, причем $\Phi(S_{i+1}) \leq 0$.

3. Необходимо оценить параметры качества COY с применением модели (3.17) $D_{i+1} = \Psi(S_{i+1}, W)$

4. Необходимо определить, удовлетворяют ли параметры качества D_{i+1} поставленным требованиям или меньше заданного значения величины ε имеется некоторый функционал. Если хотя бы одно из этих условий выполняется, то происходит прекращение итерационной процедуры. В противном случае происходит переход к пункту 2.

Изобразим структурную схему представленного выше алгоритма (рисунок 3.14).

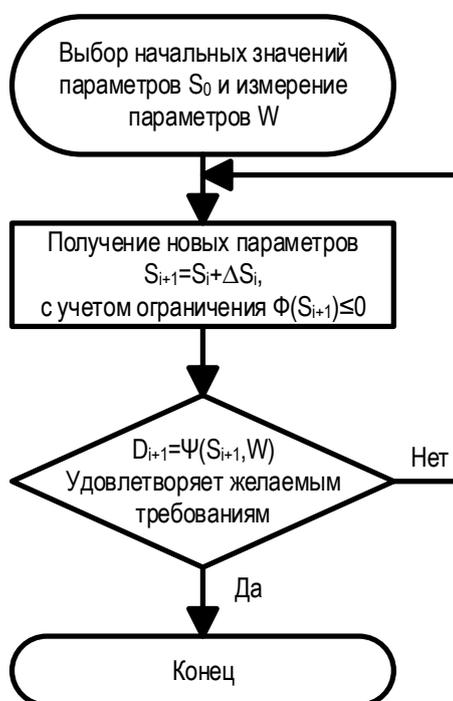


Рисунок 3.14 – Структурная схема алгоритма определения параметров управления

Главной проблемой в представленной методологии является проблема генерирования приращения ΔS_i . Чтобы получить ΔS_i можно применить градиентные методы. Но их использование чревато приведением процесса к локальным минимумам. В качестве информации можно использовать вектор производных

$$\frac{d\Psi(S,W)}{dS} \Big|_{s=s_i} \quad (3.18)$$

В тех ситуациях, когда применение итерационного алгоритма не позволяет добиться необходимых качественных характеристик, необходимо привлекать более подходящие (и, как следствие, более сложные) математические методы.

Выбор параметров процесса управления СОУ объекта является нетривиальной задачей. Поэтому для решения такой задачи нужно проводить определенные исследования. Осуществлять выбор параметров предполагается на основании использования нейросетевых технологий.

3.7 Аспекты промышленной безопасности, охраны труда и практического применения исследуемой СОУ

Требования к охране труда: согласно РД 153-39.4-056-00 Правила технической эксплуатации магистральных нефтепроводов. В рамках проекта необходимо внести следующие изменения в систему организации охраны труда:

1. В обязанности руководителей и должностных лиц ОАО МН, филиалов и их подразделений в области охраны труда по направлению эксплуатации СОУ должны быть отражены в должностных инструкциях, положениях об отделах и службах.

2. Дополнить должностные инструкции подразделений разделом об охране труда при эксплуатации АИС при работе на ПК и соблюдения

требования действующего законодательства об информационной безопасности [91-95].

Требования к персоналу. Квалифицированный персонал. Для эксплуатации указанной системы необходимы 2 инженера-технолога II категории, программист поддержки, инженер-наладчик. Система является инновационной и связана с передовыми технологиями в области применения робототехники, искусственного интеллекта и вычислительных технологий. Подготовительные курсы для персонала длятся 40 часов, из которых: теоретической части – 20 часов, работы на стендах 20 часов.

Организация проекта. При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ. Это можно сделать при помощи линейного графика работ. Для его построения определим полный перечень проводимых работ: Составление и утверждение ТЗ; подбор и изучение материалов по тематике; разработка календарного плана; обсуждение литературы; выбор структурной схемы системы и используемых математических методов; выбор методов и программных средств реализации; проведение расчетов и валидация модели; создание программного продукта; оформление расчетно-пояснительной записки.

К персоналу, обеспечивающему полный цикл работ с исследуемой системой обнаружения утечек невозможно применить какие-то определенные условия труда (рисунок 3.15). Условия работ будут различными в зависимости от каждой конкретной ситуации. Исследуемая система обнаружения утечек перед её эксплуатацией нуждается в установке, наладке, поточном ремонте. Также на нефтепроводах могут случаться аварии, диверсии, несанкционированные врезки и другие нештатные ситуации.

Вредными условиями труда являются нормативно определенными [96].

В зависимости от транспортируемого продукта, магистральные нефтепроводы бывают II, III и IV класса опасности. Однако, учитывая, что непосредственно на магистральных нефтепроводах рабочий персонал

присутствует весьма ограниченное время – во время плановых (регламентных) ремонтных работ, а также при ликвидации аварий и реагирования на внештатные ситуации (см. выше условия труда).

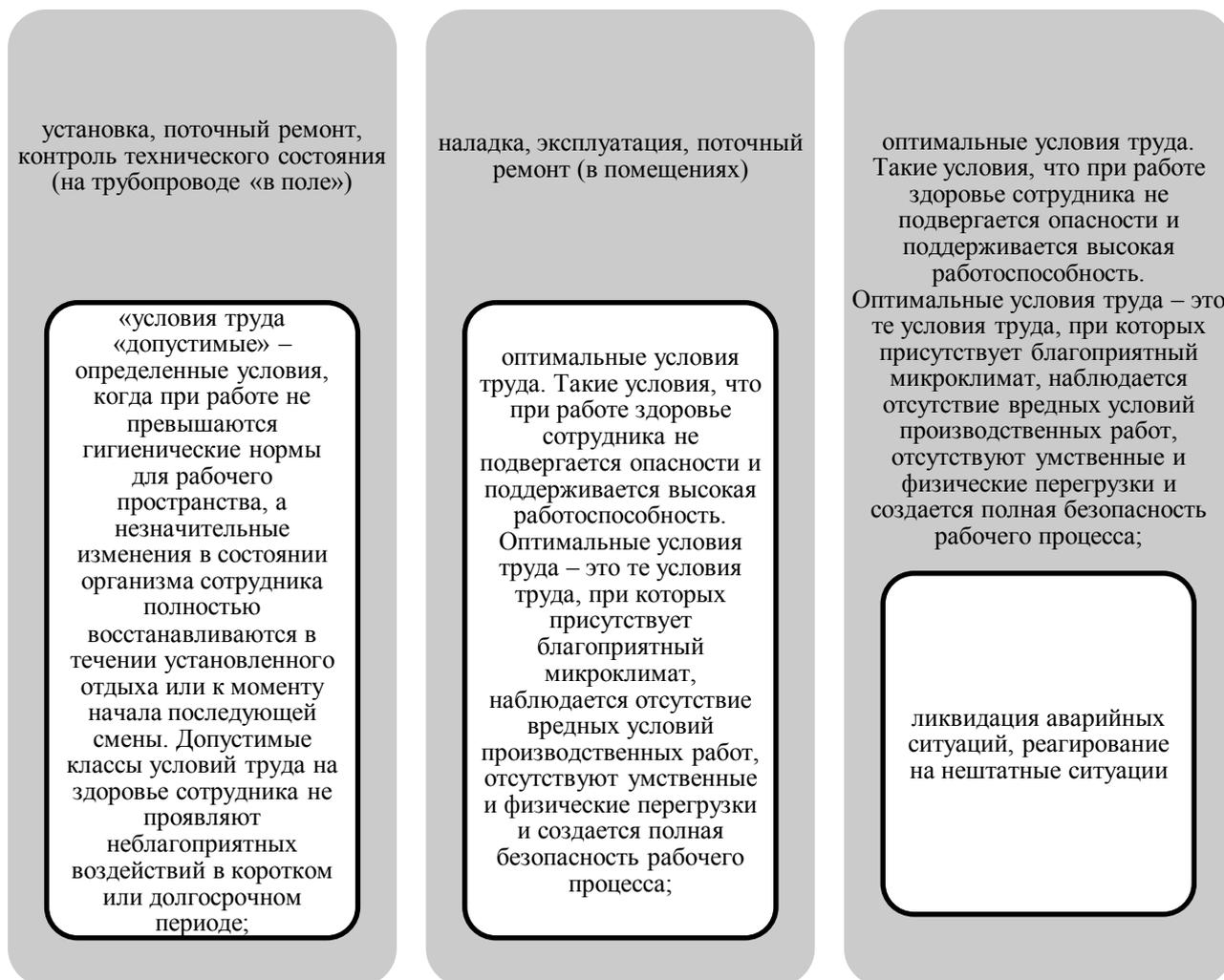


Рисунок 3.15 – Компоненты системы обнаружения утечек

Согласно закону о промышленной безопасности магистральных нефтепроводов, «исследуемая система обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах является частью системы управления промышленной безопасностью. Иначе говоря, является комплексом взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, осуществляемых организацией, эксплуатирующей опасные производственные объекты, в целях предупреждения аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, локализации и ликвидации последствий таких аварий» [29].

Требования к персоналу – квалифицированный инженерный персонал. Для эксплуатации указанной системы необходимы 2 инженера-технолога II категории, программист поддержки, 2 инженер-наладчик. Система является инновационной и связана с передовыми технологиями в области применения робототехники, искусственного интеллекта и вычислительных технологий, поэтому для получения допуска на проведение работ персоналу необходимо пройти соответствующее обучение. Подготовительные курсы для персонала делятся 40 часов, из которых: теоретической части – 20 часов, работы на стендах 20 часов.

Принципиальное строение системы. Исследуемая СУО состоит из трех частей-блоков: система управления, передачи и обработки данных; система роботизированных частиц; система поддержки.

В систему управления, передачи и обработки данных входят: станции приема-передачи данных, расположенные на протяжении трубопровода, специализированные компьютеры для обработки данных. Они же и являются приёмниками информации от станций приёма-передачи данных, расположенных на протяжении трубопровода. Система роботизированных частиц представляет собой механизмы микроскопического размера, снабжённые датчиками и передатчиком телеметрических данных. Система поддержки включает информационную, программную и консультативную поддержку от производителя; инженерно-эксплуатационную поддержку по загрузке частиц в трубопровод.

Работа СУО. Система "роя частиц" автономна, передача телеметрических данных от роя во время работы осуществляется постоянно, в автоматическом режиме через станции приёма, расположенные по всей длине трубопровода. Прием, анализ и обработка данных, полученных от частиц роя также осуществляется автоматически. Выдача данных поступает на пульт управления локальной насосной станцией. В обязанности оператора входит реагирование на изменения работы системы обнаружения утечек в реальном времени.

Повышение уровня промышленной и экологической безопасности магистральных трубопроводов достигается за счёт более быстрого реагирования на внештатные ситуации, возникающие в работе магистрального нефтепровода. Телеметрическая информация, передаваемая «роем» частиц, может служить для диагностики рабочего состояния магистральных нефтепроводов, что также повысит их уровень промышленной безопасности и длительность срока эксплуатации за счёт оперативного реагирования на внештатные ситуации и своевременные ремонтно-восстановительные работы.

Частицы роя имеют микроскопические размеры и остаются в массе нефтепродукта после их «пробега» по участку нефтепровода. Качество нефтепродукта остаётся неизменным из-за ничтожной доли микророботов в общей массе нефтепродукта. Частицы поступают в трубопровод постоянно, обеспечивая мониторинг состояния трубопровода и нефтепродукта в реальном режиме.

Описываемый в работе метод использования роя частиц может быть использован не только в нефте- и нефтепродуктопроводах, но и газопроводах и других трубопроводах, транспортирующих жидкие или газообразные вещества. Метод позволяет не только оперативно реагировать на утечки, несанкционированные врезки, но и проводить диагностику технического состояния труб и узлов магистральных трубопроводов.

Возможные аварийные ситуации. Надёжность исследуемой СУО состоит из двух основных блоков: Системы роботов (рой) и Системы управления, передачи и обработки данных. Система управления, передачи и обработки данных состоит из передатчиков, телеметрических данных от "роя", специализированных компьютеров и блоков для обработки информацией и управлением процесса в целом. Система управления может вмешиваться в работу роя частиц, если это необходимо.

Опасность аварии в системе управления, передачи и обработки данных состоит в потере управления роем частиц и прекращения или уменьшения количества телеметрических данных, передаваемых «роем».

3.8 Анализ влияния нового метода контроля утечки на повышение уровня промышленной безопасности объекта

Работа по оптимизации системы обнаружения утечек нефти из магистрального нефтепровода была направлена на минимизацию рисков промышленной безопасности трубопровода «Грушовая-Шесхарис» ПАО «Черномортранснефть». На основе рассмотренного комплекса технических решений проведем аналитическую оценку эффективности предложенной разработки. Для этого сформируем дерево рисков на объекте по трем направлениям обеспечения техносферной безопасности: безопасность жизнедеятельности, промышленная безопасность и экологическая безопасность. Дерево рисков наглядно изображено на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16 – Дерево рисков трубопровода «Грушовая-Шесхарис» ПАО «Черномортранснефть» до внедрения разработки (Построено автором по методике [97])

Построим начальное дерево рисков для трубопровода «Грушовая-Шесхарис» ПАО «Черномортранснефть» и дадим развернутой и мотивированный количественный и качественный анализ каждого элемента.

До внедрения системы обнаружения утечек для трубопровода «Грушовая-Шесхарис» ПАО «Черномортранснефть» были характерны такие риски:

- жертвы среди населения и работников ПАО в связи с возникновением угрозы здоровью и жизни из-за ЧС вследствие утечки (взрыва, пожара) нефти;
- экологический риск несвоевременного обнаружения утечки нефтепродуктов и, как следствие, нанесение ущерба окружающей среде с невозможностью полной или частичной ее ликвидации;
- отказ системы экстренного реагирования на ЧС как риск выброса в окружающую среду (атмосферу) вредных веществ (включая вероятность взрыва или пожара);
- невозможность быстрой ликвидации последствий и риск убытков вследствие уплаты штрафов за нарушение экологического законодательства;
- отказ промышленного оборудования системы предотвращения нарушения целостности трубопровода как единственно возможного элемента экстренного реагирования на возникающую угрозу;
- промышленный риск возникновения ЧС и нарушение целостности промышленного оборудования, вплоть до остановки деятельности участка нефтепровода и поднесение экономических убытков;
- невозможность своевременного проведения ремонтно-восстановительных работ из-за отсутствия данных о причине и типе поломки, приведшей к утечке на трубопроводе.

Далее используем методику чек-листов [98] для идентификации рисков, путем использования заранее разработанных (на основании экспертной оценки ПАО «Черномортранснефть») списков рисков и угроз. Это даст возможность проследить количественные изменения вероятности возникновения рисков после внедрения нейронной сети, архитектура и принцип работы который

представлен в данной работе. Расчеты вероятности рисков системы наглядно продемонстрированы в таблице 3.3:

Таблица 3.3 - Результаты оценки вероятности рисков. До и После внедрения

Краткое наименование риска	Сценарий аварийной ситуации	Безвозвратные потери, чел	Санитарные потери, чел	Вероятность реализации сценария «ДО», 1/год	Вероятный ущерб, тыс. руб.	Вероятность реализации сценария «ПОСЛЕ», 1/Гд
жертвы среди населения	С-1	0	0	$1,82 \cdot 10^{-5}$	8,0	$0,71 \cdot 10^{-5}$
	С-2	0	1	$5,76 \cdot 10^{-6}$	215,1	$1,22 \cdot 10^{-6}$
	С-4	1	0	$6,00 \cdot 10^{-6}$	2012,7	$3,12 \cdot 10^{-6}$
Жертвы среди работников предприятия	С-1	0	0	$2,23 \cdot 10^{-6}$	6,4	$1,60 \cdot 10^{-6}$
	С-3А	1	1	$1,18 \cdot 10^{-7}$	2274,5	$0,57 \cdot 10^{-7}$
риск несвоевременного обнаружения утечки	С-1	0	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	264,02	$0,12 \cdot 10^{-5}$
	С-3Б	1	1	$1,90 \cdot 10^{-6}$	4840,02	$0,03 \cdot 10^{-6}$
	С-4	1	1	$4,50 \cdot 10^{-6}$	4840,02	$0,01 \cdot 10^{-6}$
отказ системы экстренного реагирования на ЧС	С-1	0	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	264,03	$0,95 \cdot 10^{-5}$
	С-3Б	1	1	$1,90 \cdot 10^{-6}$	4840,03	$0,90 \cdot 10^{-6}$
	С-4	1	1	$4,50 \cdot 10^{-6}$	4840,03	$3,97 \cdot 10^{-6}$
невозможность быстрой ликвидации последствий и штрафы	С-1	0	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	264,02	$0,85 \cdot 10^{-5}$
	С-3Б	1	1	$1,90 \cdot 10^{-6}$	4840,02	$1,12 \cdot 10^{-6}$
	С-4	1	1	$4,50 \cdot 10^{-6}$	4840,02	$2,12 \cdot 10^{-6}$
отказ системы предотвращения нарушения целостности трубопровода	С-1	0	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	264,03	$0,21 \cdot 10^{-5}$
	С-3Б	1	1	$1,90 \cdot 10^{-6}$	4840,03	$0,87 \cdot 10^{-6}$
	С-4	1	1	$4,50 \cdot 10^{-6}$	4840,03	$2,25 \cdot 10^{-6}$
риск возникновения ЧС	С-1	0	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	264,03	$0,21 \cdot 10^{-5}$
	С-3Б	1	1	$1,90 \cdot 10^{-6}$	4840,03	$0,87 \cdot 10^{-6}$
	С-4	1	1	$4,50 \cdot 10^{-6}$	4840,03	$3,78 \cdot 10^{-6}$
невозможность своевременного проведения ремонтно-восстановительных работ	С-1	0	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$	1012,15	$0,58 \cdot 10^{-5}$
	С-3Б	1	2	$1,90 \cdot 10^{-6}$	12520,15	$1,62 \cdot 10^{-6}$
	С-4	2	2	$4,50 \cdot 10^{-6}$	14520,15	$4,22 \cdot 10^{-6}$

* Сценарии: С 1 - локализация аварийной ситуации

С 2 Взрыв ТВС в помещении А / газопровода Б

С 3 Взрыв ТВС на открытой площадке

С 4 Факельное горение

Таким образом, повышение уровня промышленной безопасности на магистральных нефтепроводах после внедрения системы обнаружения утечек вызовет минимизировать риски за счет:

- постоянного мониторинга всего участка нефтепровода,
- достижения минимального времени реагирования на внештатные ситуации,
- оптимизации проведения ремонтно-восстановительных работ, основываясь на получаемой телеметрической информации,
- снижения уровня промышленных рисков утечки нефти и развития чрезвычайной ситуации и ее последствий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был описан инновационный метод обнаружения утечек с помощью «роя» роботов-частиц, предназначенный для применения на магистральных нефтепроводах с целью оперативного обнаружения аварий, несанкционированных врезок и других нештатных ситуаций. Разработанная система обнаружения утечек позволяет проводить постоянный мониторинг технического состояния самого нефтепровода, что существенно облегчает его ремонт и повышает срок эксплуатации.

Эффективность работы системы зависит от выбранного алгоритма управления частицами в потоке нефтепродукта. В работе были рассмотрены наиболее типичные и подходящие алгоритмы управления роем роботов-частиц. В качестве алгоритма процесса управления (поиска оптимального процесса управления) в представленной работе предлагается алгоритм, основанный на самоорганизующихся картах Кохонена.

Самоорганизующаяся карта Кохонена – нейронная сеть с элементами искусственного интеллекта, которая работает над группировкой (кластеризацией) данных. Программа самообучения вносит изменения в топологической карте, изменяя местоположение её элементов согласно алгоритму обучения.

Классическая модель нейронной сети, предоставляет возможности кластерного анализа многомерных данных и является средством визуального отображения характера их распределения на двумерной топологической карте.

Описано решение известных проблем самоорганизующихся карт Кохонена классической модели, такие как «граничный эффект» и «мертвые нейроны» влияют на точность и качество анализа данных. Для преодоления этих проблем с сохранением важных свойств классической модели самоорганизующийся карте Кохонена в работе предложена новая модель сети этого типа, в решетке которой нейроны на границах соединяются между собой. Телеметрическая информация, полученная от частиц,двигающихся в потоке

нефтепродукта посредством использования управляющих алгоритмов, обрабатывается на вычислительном центре. Результаты такой обработки выводятся на пульт управления нефтепроводом.

Благодаря постоянному нахождению роя роботов-частиц в потоке нефтепродукта и передаче телеметрических данных о состоянии нефтепровода возможно не только более быстрое реагирование на нештатные ситуации, но и своевременное распознавание и прогнозирование аварийных ситуаций, связанных с физической изношенностью нефтепровода. Система позволяет указать место и характер проведения ремонтно-восстановительных или внеплановых регламентных работ, что, несомненно сказывается на увеличении срока эксплуатации нефтепровода и на уменьшении вероятностей аварий на нём. Отказ или аварийная ситуация системы обнаружения утечек, основанной на работе «роя» микроскопических роботов-частиц не может привести к повреждению трубопровода, разливам нефтепродуктов в окружающую среду, повреждению трубопровода и иного оборудования. Последствия максимальной проектной аварии заключаются в потере связи с «роем» и прекращению приёма телеметрической информации, исходящей от него.

Рассмотрены аспекты применения, исследована проблема апробации и имплементации системы обнаружения утечек на магистральных нефтепроводах в уже существующую систему управления состоянием нефтепровода.

Повышение уровня промышленной безопасности на магистральных нефтепроводах после внедрения системы обнаружения утечек достигается за счёт:

- постоянного мониторинга всего участка нефтепровода,
- достижения минимального времени реагирования на нештатные ситуации,
- оптимизации проведения ремонтно-восстановительных работ, основываясь на получаемой телеметрической информации,
- снижения уровня промышленных рисков утечки нефти и развития ЧС и ее последствий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, Т. Г. Трубопроводный транспорт нефти [Текст] : учеб. для вузов в 2-х т. / Т. Г. Васильев ; под ред. С.М. Вайнштока ; – М. : Недра-Бизнесцентр, 2012. – Т.1. – 407 с.
2. Коршак, А. А., Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов [Текст] : учебник для вузов / под ред. А.А. Коршак, – СПб. : Недра, 2008. – 488 с.
3. Крылов, Г. В. Эксплуатация и ремонт нефтепроводов и нефтехранилищ [Текст] : учеб. пособие для сред. проф. образования / Г.В. Крылов – М. : Образовательно-издательский центр «Академия», 2012. – 560 с.
4. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила СНиП 2.05.06–85 [Электронный ресурс] разр. 10.11.1996 г. Госстроем России. – М. : ГУП ЦПП, 2001. – 60 с. <http://www.vashdom.ru/snip/20506-85> (дата обращения 10.01.2018)
5. Требования к технологическим схемам нефтеперекачивающих станций, профилям и схемам линейной части магистральных нефтепроводов [Электронный ресурс] от 21.07.2000 г. № ОР-75.180.00-КТН-039-08 <http://otdel-ptu.ru/rukovodyashhie-dokumenty/rd-75-180-00-ktn-259-14/> (дата обращения 10.01.2018)
6. Магистральный нефтепроводный транспорт. Термины и определения. [Электронный ресурс]: ГОСТ Р 57512-2017 (вступление в силу 01.04.2018), URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200146219> (дата обращения 10.01.2018)
7. Справочник инженера по эксплуатации нефтегазопроводов и продуктопроводов / Под ред. Г.В. Бахмат [Текст] – М.: "Инфра-Инженерия", 2006. – 928 с.
8. Фукс, Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов [Текст] / Г.И. Фукс – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 238 с.
9. Лурье, М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа [Текст] : учебное пособие / М.В.

Лурье ; РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – М. : Издательство Нефти и газа, 2003. – 336 с.

10. Молчанов, В. П., Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами [Текст] / В. П. Молчанов, В. П. Сучков, И. Ф. Безродный. – М. : НИИТЭХИМ, 1992, – 97 с.

11. Ros-Pipe. Дыхательная арматура. [Электронный ресурс]: <http://ros-pipe.ru/clauses/dykhatel'naya-armatura-1/> (дата доступа 10.06.2018)

12. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. [Текст] – М. : Недра, 1988. – 182 с.

13. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. - Гидравлические машины, агрегаты и установки. Т. IV-20 / Ю.С. Васильев, В.А. Умов, Ю.М. Исаев и др. Под ред. Ю.С. Васильева, Г.П. Поршнева. [Текст] М. : Машиностроение – 2015. – 584 с.

14. Безбородов, Ю. Н. Промышленная безопасность объектов нефтепродуктообеспечения. [Текст] / Ю. Н. Безбородов, Л. Н. Горбунова, В. А. Баранов, В. Н. Подвезенный. – Красноярск: ИПК СФУ, 2011. – 606 с.

15. Марцев, Ю. П., Дополнительное оборудование для повышения экологической безопасности резервуарного парка [Текст] / Ю. П. Марцев, М. Е. Елисеев, Т. Ю. Марцева // Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук. М. : 2012. – № 6, – С. 89-91.

16. Махонин, Д. А. Повышенная степень опасности при эксплуатации топливных резервуаров и требования безопасности [Электронный ресурс] / Д. А. Махонин // Инновации в строительстве и промышленности. М. : 2016. – № 9 (11), URL: <http://spdpusk.ru/journal/vypusk-10-12-aprel-2016/makhonin-d-a-povyshennaya-stepen-opasnosti-pri-ekspluatatsii-toplivnykh-rezervuarov-i-trebovaniya-be/> (дата доступа 10.01.2018)

17. Межгосударственный стандарт ГОСТ 17032-2010 "Резервуары стальные горизонтальные для нефтепродуктов. Технические условия" [Электронный ресурс] (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому

регулированию и метрологии от 19 апреля 2011 г. N 50-ст) URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-17032-2010> (дата доступа 10.01.2018).

18. Еремин, В. Н., Овчинин, Д. И., Завьялов А.В., Стрильченко Т.Г., Юрин В.Е. Повышение экологической безопасности резервуаров для хранения светлых нефтепродуктов. [Текст] / В. Н. Еремин, Д. И. Овчинин, А. В. Завьялов, Т. Г. Стрильченко, В. Е. Юрин // ФАУ 25 ГосНИИ химмотологии МО РФ. М. : ФАУ – 2017 № 8. – С. 31-35.

19. Ведомственные строительные нормы. Инструкция по проектированию, строительству и реконструкции промышленных нефтегазопроводов. [Электронный ресурс]: URL: http://www.snip-info.ru/Sp__34-116-97.htm (дата обращения 08.01.2018).

20. Харитонов, В. А. Строительство магистрального трубопровода нефти и газа [Текст]: монография / В. А. Харитонов; Ассоциация строительных вузов. – М. :, 2008. – 488 с.

21. Тортбаева, Д. Р. Методы увеличения пропускной способности трубопровода посредством лупингов и вставок [Текст] / Д. Р. Тортбаева, Н. К. Джексенбаев, Р. С. Ходжабаев; Казахский Научно-Исследовательский Технический Университет им. К.И.Сатпаева. – Алматы : КНИТУ – 2017. – С. 110-113.

22. Коршак, А. А. Обеспечение надёжности магистральных трубопроводов [Текст] / А. А. Коршак; ООО ДизайнПолиграфСервис. – Уфа., 2015. – 170 с.

23. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. [Электронный ресурс] Указ Президента РФ № 176 от 19.04.2017 г. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102430636> (дата доступа 11.01.2018)

24. Энергетическая стратегия России до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р. Доступ из системы «Консультант плюс» (дата обращения: 05.10.2017).

25. Проект энергостратегии Российской Федерации на период до 2035 года. (редакция от 01.02.2017) [Электронный ресурс] Министерство Энергетики Российской Федерации. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920> (дата обращения 10.01.2018)
26. Земенков, Ю.Д. Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности [Текст]: учебное пособие / Ю. Д. Земенков ; Инфра-Инженерия. – М. : 2017. – 608 с.
27. О магистральном трубопроводном транспорте [Электронный ресурс]: проект Федерального Закона РФ № 99045329-2. Ред., принятая ГД ФС РФ в первом чтении от 21.09.1999. URL: <https://www.lawmix.ru/lawprojects/72739> (дата обращения: 05.10.2017).
28. Морев, А. А., Повышение надежности защиты технологических установок и процессов добычи, переработки, транспортировки, хранения и сжижения природного газа с использованием импульсных предохранительных устройств [Текст] / А. А. Морев, А. А. Летунов // Газовая промышленность. – 2017. – № 9 (757) – С. 126–127.
29. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 21.07.1997 №1997-ФЗ (ред. от 07.03.2017) URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102048376> (дата обращения 10.01.2018)
30. Правила охраны магистральных трубопроводов [Электронный ресурс]: утв. Минтопэнерго РФ 29.04.1992, Постановлением Госгортехнадзора РФ от 22.04.1992 № 9. URL: <https://www.audit-it.ru/articles/personnel/a114/60031.html> (дата обращения: 05.10.2017).
31. РД-13.320.00-КТН-223-09 Системы обнаружения утечек комбинированного типа на магистральных нефтепроводах. Общее техническое задание на проектирование, изготовление и ввод в эксплуатацию. Руководящие документы ООО «Транснефть» [Электронный ресурс]. URL https://otdel-pto.ru/wp-content/uploads/2016/08/4_Reestr-RD_AKTN.xls (дата обращения 05.10.2017)

32. Зверев, Ф. С. Совершенствование технологий обнаружения утечек нефти из трубопроводов [Текст] : дис. канд. техн. наук : 25.00.19 : защищена 29.04.2010 / Зверев Фёдор Сергеевич – М. :, 2010. – 173 с.
33. О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 21.07.2011 № 256-ФЗ, URL: <https://rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (дата обращения 10.01.2018)
34. "Уголовный кодекс Российской Федерации" [Электронный ресурс] от 13.06.1996 N 63-ФЗ (ред. от 31.12.2017) URL: <http://ppt.ru/kodeks.phtml?kodeks=20> (дата обращения 10.01.2018)
35. Нефть в России стали воровать в промышленных масштабах. [Электронный ресурс] URL: <http://top.rbc.ru/economics/28/01/2013/842358.shtml> (дата обращения: 05.10.2017).
36. Плюхина, Е. Е. Метод обнаружения несанкционированных врезок и диверсий на трубопроводах [Текст] / Е. Е. Плюхина // Вестник ОГУ– 2011.– №16 (135). – С.92-95.
37. Шестаков, Р. А. К вопросу о методах обнаружения утечек и несанкционированных врезок на магистральных нефтепроводах [Текст] / Р. А. Поляков // Вестник РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2015. – № 1. С. 85-94.
38. Поляков, В. А. Влияние ответвления на режим перекачки нефти по трубопроводу [Текст] / В. А. Поляков, Р. А Шестаков // Вестник РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. М. – 2014. – № 2. С. 33-42.
39. Гольянов, А.А., Системы контроля утечек из магистральных трубопроводов [Текст]: материалы научно-методической конференции:/ А. А. Гольянов, А. И. Гольянов // Проблемы нефтегазовой отрасли. Уфа – 2010. – С. 174-176.
40. Джус, А.И. Модернизация параметрической системы управления утечек нефтепроводов. [Электронный ресурс] маг.дис. 27.04.04 : защищена 09.06.2017 URL <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/39294/1/TPU381561.pdf> (дата обращения 10.01.2018)

41. Шестаков, Р. А., Анализ нормативных методов обнаружения утечек и пути их совершенствования [Электронный ресурс] / Р. А. Шестаков, Д. Н. Комаров, С. А. Филиппов. – URL <https://cyberleninka.ru/article/v/analiz-normativnyh-metodov-obnaruzheniya-utechek-i-puti-ih-sovershenstvovaniya>
42. Чупин, В. Р. Методы обнаружения утечек газа из магистральных трубопроводов /В. Р. Чупин, Е. В. Гаськов, Д. И. Майзель // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2012. – № 2 (3). – С. 123–127.
43. Валов, Д. О. Обзор принципов построения систем обнаружения утечек [Текст] / Д. О. Валов, С. В. Емец // Информационные технологии. Проблемы и решения. М. : – 2014. – № 1(1). – С. 49–52.
44. Шестаков, Р. А., Анализ волоконно-оптических методов обнаружения утечек в трубопроводах / Р. А. Шестаков, Л. К. Ганеева, // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И. М. Губкина. М. : – 2015. – № 2 – С. 56–64.
45. Проектирование и разработка: учебно-практическое пособие [Текст] : справочник инженера по АСУТП в 2-х т. 2-е изд., – Т. 2. М. : Инфра-Инженерия. – 2017. – 484 с.
46. Усольцева, Э. Ф., Анализ видов выявления утечек на нефтепроводах [Текст] / Э.Ф. Усольцева, А. С. Максименко, В. А. Сивашенко, Д. А. Шевелёва // Научные достижения и открытия современной молодёжи: сборник статей II Международной научно-практической конференции. Пенза, 2017. – С. 64-67.
47. Абдрахимов, Ю.Р. Методы диагностирования магистральных трубопроводов [Текст] / Ю.Р. Абдрахимов, З.А. Закирова, А.Х. Басирова // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 4. – С. 46–49.
48. Подавалов, Ю. А. Экология нефтегазового производства. [Текст] – М. : Инфра-Инженерия, 2010. – 416 с.
49. Спирин, Е. Ю. Система оперативного обнаружения утечек в магистральных нефтепродуктопроводах [Текст] : измерительные преобразователи и информационные технологии. Межвузовский научный сборник. Уфимского государственного авиационного технического

- университета / Е. Ю. Спирин, М. И. Хакимьянов ; –Уфа: УГАТУ, 1999. – С. 47–52.
50. Акустический метод контроля и поиска течей в трубопроводах [Электронный ресурс]. – URL: <http://te4b.ru/akusticheskij-metod-kontrolya> (дата обращения 10.01.2018)
51. Зиганшин, Ш. Г. Виброакустический способ и информационно-измерительная система контроля состояния трубопроводов на основе конечно-элементного анализа и нейросетевого моделирования [Текст] : автореферат дис. канд. техн. наук: 05.11.13. защищена 18.12.2009 / Зиганшин Шамиль Гаязович. – Казань, 2009. – 17 с.
52. Перевалочный Комплекс «Шесхарис» // АО «Черномортранснефть». Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: http://chernomor.transneft.ru/about/struktur_podr/shesharis (дата обращения 10.01.2018)
53. Автоматизация промышленных площадок «Грушовая» и «Шесхарис» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nefteavtomatika.ru/content/avtomatizaciya-promyshlennyh-ploshchadok-grushovaya-i-shesharis>
54. Низамутдинов, Р. И. Обнаружение утечек на нефтепроводах с безнапорными участками на принципах контроля основных параметров потока [Текст] : дис. канд. тех. наук: 05.11.13 : защищена 12.12.2017 / Низамутдинов Роберт Ильдарович, – СПб.: ПГУ, 2017. – 123 с.
55. Результаты поиска по базе патентов мира «Система PATENTSCOPE» по запросу «Система обнаружения утечек нефти» [Электронный ресурс]. –URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf> (дата обращения 10.01.2018)
56. Мишкин, Г. Б. Краткий обзор систем обнаружения утечек российских производителей [Текст] / Г. Б. Мишкин // Молодой ученый. – 2011. Т.1. №2. – С. 41–47.

57. Щепинов, Д. Н., Техническая диагностика трубопроводов и оценка потенциальной опасности дефектов [Текст] : учеб. пособие / Д. Н. Щепинов, А. А. Бауэр. Оренбург : Газпресс, 2014. – 240 с.
58. Селезнёв, В. Е. Методы построения моделей течений в магистральных трубопроводах и каналах: монография [Текст] / В. Е. Селезнев, С. Н. Прялов. М.: Едиториал, 2012. – 560 с.
59. Мишкин, Г. Б. Краткий обзор систем обнаружения утечек российских производителей. [Электронный ресурс]. – URL <https://moluch.ru/archive/25/2727/> (дата обращения: 15.01.2018).
60. Черняев, К. В. Мониторинг технического состояния нефтепроводов [Текст] / К. В. Черняев // Трубопроводный транспорт нефти. – Воронеж. – 2000. – №9. – С. 14–17.
61. Ежов, А. А., Нейрокомпьютинг и его применения в экономике и бизнесе [Текст] / А. А. Ежов, С. А. Шумский / М.: МИФИ, 2008. – 224 с.
62. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика [Текст] / Ф. Уоссермен ; М. : Мир, 2012.
63. Солнышкин, Н. П., Технологические процессы в машиностроении [Текст] / Н. П. Солнышкин, А.Б. Чижевский, С.И. Дмитриев ; издательство СПбГТУ – СПб., 2008.
64. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения [Текст] / под. ред. А.В. Лотова ; М. : Радио и связь, 2012. – 504 с.
65. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин – М. : Физматиздат, 2004. – 176 с.
66. Tkachenko P. Analysis of the effectiveness of some modifications of the classical particle swarm // Series "Natural & Technical Sciences" # 11/2017. URL: <http://www.vipstd.ru/index.php/en/2053-nt-2017-11-11>(дата обращения 10.01.2018)
67. Процыков, Г. В. Об эффективности коэволюционного подхода в практических задачах оптимизации [Текст] / Г. В. Процыков, Е. С. Семенкин, К. А. Томкин // Вестник Красноярского государственного университета. – Красноярск, 2015. – № 4. – С. 233-239.

68. Kennedy, J. Particle Swarm Optimization [Текст] / J. Kennedy, R. C. Eberhart // IEEE International Conference on Neural Networks. – Perth, Australia, 1995. – P. 1942–1948.
69. Карпенко, А. П. Метод мета-оптимизации поисковых алгоритмов оптимизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/.../meta-optimizatsiya-populyatsionnyh-algoritmov-mnogotselevogo-poiska.pdf>. (дата обращения 10.01.2018).
70. Неитеративные, эволюционные и мультиагентные методы синтеза нечеткологических и нейросетевых моделей: Монография [Текст] / под ред. С.А. Субботина. – Запорожье: Издательство ЗНТУ, 2009. – 375 с.
71. Горбаченко В. И. Сети и карты Кохонена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gorbachenko.self-organization.ru/articles/Self-organizing_map.pdf
72. Карпенко, А. П. Обзор методов роя частиц для задачи глобальной оптимизации [Текст] / А. П. Карпенко, Е. Ю. Селиверстов // Наука и образование, 2009. – № 3.
73. Heppner, F. A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks [Текст] / F. Heppner, U. Grenander // The Ubiquity of Chaos. – Washington, DC.: AAAS Publications, 1990. – PP. 233-238.
74. Wilson, E. O. Sociobiology: The new synthesis [Текст] / E.O. Wilson. – Cambridge, MA: Belknap Press, 1975. – 697 p.
75. Девятков, В. В. Системы искусственного интеллекта [Текст] : учебное пособие / В. В. Девятков; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. – М. : МГТУ, 2012. – 352 с.
76. Самоорганизующиеся карты Кохонена [Электронный ресурс]: URL: <https://intellect.ml/samoorganizuyushhiesya-karty-kokhonena-6543> (дата обращения 10.01.2018)
77. Нечаева, О. И. Сглаживание адаптивных сеток, построенных методом самоорганизующихся карт [Текст] / О. И. Нечаева // Вестник Томского государственного университета. 2008. – №4(5). – с. 51–60.

78. Рыжков, В. А., [Текст] / В. А. Рыжов, Е. Н. Лычкин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. М. : Радиотехника. – 2009 – №10. – с. 73-83.
79. Рекомендация МСЭ-Т G.694.1 Спектральные сетки для приложений WDM: сетка частот CWDM. [Электронный ресурс] URL <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=11482&lang=ru> (дата доступа 10.01.2018)
80. Чуткое волокно. Пресс-центр ПАО «Транснефть». [Электронный ресурс] URL <http://www.transneft.ru/pressroom/rg6-11> (дата доступа 10.01.2018)
81. Гордиенко, В. Н., Оптические телекоммуникационные системы [Текст] / В. Н. Гордиенко, В. В. Крухмалев, А. Д. Моченов, Р. М. Шарафутдинов ; М. : Горячая линия-Телеком, 2014.
82. Семенов, А. Б. Структурированные кабельные системы / А. Б. Семенов, С. К. Стрижаков, И. Р. Сунчелей [Электронный ресурс] URL: <https://rucont.ru/file.ashx?guid=e59da1ab-72f8-42ce-ac38-4c8b199abfsc> (дата доступа 10.01.2018)
83. Чео, П. К. Волоконная оптика [Текст] / П. К. Чео ; М. : Энергоиздат, 2008. – 185 с.
84. Стандарт ОСТ 45.178-2001. Системы передачи с оптическими усилителями и спектральным уплотнением [Текст]. – Введ.2001-08-01. – М. : Изд-во стандартов, 2001.
85. Рекомендация МСЭ-Т G.692. Оптические интерфейсы для многоканальных систем с оптическими усилителями. Исправление 2.
86. Эндрю, П. Сейдж, Идентификация систем управления [Текст] / Эндрю П. Сейдж, Джеймс Л. Мелса; М. : Наука, 1994. – 248 с.
87. Энциклопедия АСУ ТП. Интерфейсы RS-485, RS-422 и RS-232 [Электронный ресурс] URL: http://www.bookasutp.ru/Chapter2_3.aspx (дата доступа 10.01.2018)
88. Ивахненко, А. Г., Моделирование сложных систем по экспериментальным данным [Текст] / А. Г. Ивахненко, Ю. П. Юрачковский ; М. : Наука, 2007. – 120 с.

89. Низамутдинов, Р. И. Создание математической модели нефтепровода с целью построения системы его диагностики [Текст] / Р. И. Низамутдинов, Р. М. Проскуряков // Естественные и технические науки. – 2016. – №4. – С. 161–164.
90. Низамутдинов, Р. И. Система обнаружения утечек [Текст] / Р. И. Низамутдинов // Записки Горного института Проблемы рационального природопользования. – 2009. – Т. 182 – С. 255–258.
91. О безопасности. Федеральный закон [Электронный ресурс] от 28.12.2010 г. № 390-ФЗ, URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102144301> (дата обращения 10.01.2018)
92. Об информации, информационных технологиях и о защите информации. Федеральный закон [Электронный ресурс] от 08.07.2006 г. № 149-ФЗ (в ред. от 27.07.2006) URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102108264> (дата обращения 10.01.2018)
93. О персональных данных [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 27.07.2006 г. № 152-ФЗ, URL: <http://base.garant.ru/12148567/> (дата обращения 10.01.2018)
94. Требования по защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ, от 01.11.2013 г. № 1119, URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102160483> (дата обращения 10.01.2018)
95. Положение об особенностях обработки персональных данных, осуществляемой без использования средств автоматизации [Электронный ресурс]: Постановление правительства РФ от 15. 09.2008 г. № 687, URL: <http://base.garant.ru/193875> (дата обращения 10.01.2018).
96. О специальной оценке условий труда [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 28.12.2013 №426-ФЗ (ред. от 01.05.2016 с изм. и доп вступ. в силу с 18.05.2016) URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102170672> (дата обращения 10.01.2018).

97. Управление рисками, системный анализ и моделирование // Методические указания по дисциплине «Техносферная безопасность» [Электронный ресурс]: http://pstu.ru/files/file/oksana/2012/innovacii/pnr/pnr4/upravlenie_riskami/prezentaciya.pdf (дата обращения 10.01.2018)
98. Энциклопедия по экономике. Основные методы по оценке риска [Электронный ресурс] <http://economy-ru.info/info/130524> (дата обращения 10.01.2018)
99. Parra Hernandez R., Alvarez Gallegos J., Hernandez Reyes J.A. Simple recurrent neural network: a neural network structure for control systems // *Neurocomputing*. 1998. Т. 23. № 1-3. PP.. 277-289.
100. Mendes R. The fully informed particle swarm: Simpler, maybe better / R. Mendes, J. Kennedy, J. Neves // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 2004. – V.8. – PP. 204-210.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 Сравнительная характеристика методов обнаружения утечек жидкости из трубопровода

Название метода	Визуальный осмотр	Использование внутритрубных дефектоскопов	Метод «по волне давления»	Параметрические методы	Акусто-эмиссионный метод	Волоконно-оптический контроль	Метод на основе нейросетевой модели
Достоинства	Простая реализация, низкая стоимость	Выявляет мелкие трещины в трубе	Простая реализация, низкая стоимость	Простая реализация, низкая стоимость	Регистрирует мелкие утечки, точно локализует их	Регистрирует мелкие утечки и врезки, точно локализует их	Простая реализация, низкая стоимость
Точность метода	~±100м	- ± 0,01м	- ± 300м	- ± 5км	~±5м	~±5м	~±3км
Экономическая составляющая	Нет затрат на внедрение	Запуск обходится в несколько миллионов рублей	Нет затрат на внедрение	Нет затрат на внедрение	Затраты на установку большого количества датчиков	Затраты на прокладку протяженного ВО- кабеля	Требуется покупка ПО
Примечание	Внедрен на действующих трубопроводах. Нет оперативности, находит только видимые утечки	Внедрён на действующих трубопроводах. Нет оперативности, дорогая эксплуатация	Внедрён на действующих трубопроводах. Не находит медленно развивающиеся утечки	Внедрён на действующих трубопроводах. Неточная локализация	Внедрён на действующих трубопроводах. Требуется монтаж датчиков через каждые 3 км	Большое количество ложных срабатываний, дорогая реализация	Легко внедряется на основе существующих датчиков и контроллеров

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Псевдокод канонического алгоритма оптимизации роем частиц

```
// Инициализация роя (задание s, d, w, c1, c2 и других переменных)
For i = 1 to s
  For j = 1 to d
    x[i][j] = rand(xmin[j], xmax[j])
    v[i][j] = (rand(xmin[j], xmax[j]) - x[i][j]) / 2
    p[i][j] = x[i][j]
  Next j
  fitness[i] = f(x[i])
  fp[i] = fitness[i]
Next i

// Поиск номера лучшей частицы в рое
gbest = 1
For i = 2 to s
  if fp[i] < fp[gbest] then gbest = i
Next i

// Обновление состояния роя
Do
  // Обновление скоростей и положений частиц
  For i = 1 to s
    For j = 1 to d
      r1 = rand(0, 1)
      r2 = rand(0, 1)
      v[i][j] = w*v[i][j] + c1*r1*(p[i][j] - x[i][j])
      if (i != gbest) then
        v[i][j] = v[i][j] + c2*r2*(p[gbest][j] - x[i][j])
      endif
      x[i][j] = x[i][j] + v[i][j]
    Next j
  Next i
// Проверка выхода за границы пространства поиска
  if x[i][j] < xmin[j] then
    x[i][j] = xmin[j] v[i][j] = 0
  endif
Until
```

```

if x[i][j] > xmax [j] then
x[i][j] = xmax[j]
v[i][j] = 0
endif
Next j
Next i
// Обновление текущего лучшего решения частицы
For i = 1 to s
fitness[i] = f(x[i])
if fitness[i] < fp [i] then
fp[i] = fitness[i]
For j = 1 to d
p[i][j] = x[i][j]
Next j
endif
Next i
// Обновление номера лучшей частицы роя
For i = 1 to s
iffp[i] < fp[gbest] then gbest = i
Next i
Until не выполнено условие останова
// Вывод результатов: f=fp[gbest], X = p[gbest]

```

В представленном псевдокоде символ «!=» означает операцию проверки на неравенство, а «//» используется в качестве признака начала однострочных комментариев. Также в тексте для краткости опущена начальная инициализация некоторых переменных и массивов.