


ФГБОУ ВО «УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

На правах рукописи



САЙФУТДИНОВ АСКАР ИЛЬДАРОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНОГО  
ПЕРЕХОДА НЕФТЕПРОВОДА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЕГО  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

Специальность 25.00.19 – «Сооружение и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор  
Геннадий Евгеньевич Коробков

Ухта - 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ .....	12
1.1 Характеристика и обеспечение требуемого технического состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов .....	12
1.2 Влияние этапов жизненного цикла на техническое состояние подводных переходов .....	26
1.3 Современное состояние информационного обеспечения создания моделей оценки и прогнозирования технического состояния ПП.....	34
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	39
ГЛАВА 2 УСТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК, ПОИСК И АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ВЫБОРА СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЕГО МОДЕЛЕЙ.....	40
2.1 Проблемы моделирования технического состояния подводных переходов..	40
2.2 Эволюция классификации дефектов .....	42
2.3 Требования к качеству исходных данных в системе принятия решений, связанных с надежностью и эффективностью эксплуатации подводного перехода .....	45
2.4 Структура исходных данных, необходимой для управления надежностью и эффективностью эксплуатации подводных переходов.....	49
2.4.1 Разработка базы моделирования оценки технического состояния подводного перехода .....	51
2.4.2 Информационный анализ исходных данных .....	55
2.4.3 Определение требований к техническому уровню специалистов .....	58

2.4.4 Цель создания системы поддержки принятия решений при эксплуатации подводных переходов .....	60
2.4.5 Проектирование базы исходных данных по подводным переходам как основы создания математических моделей их технического состояния .....	62
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	76
ГЛАВА 3 ПОИСК И АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ВАРИАЦИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА.....	77
3.1. Моделирование коррозионного износа трубопровода.....	82
3.2. Моделирование малоцикловой усталости трубопровода .....	89
3.3. Анализ робастности математической модели малоцикловой усталости подводных переходов .....	98
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	108
ГЛАВА 4 ДОСТОВЕРНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ФОРМИРОВАНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОСТАВУ И СРОКАМ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА.....	109
4.1 О необходимости повышения достоверности математических моделей оценки технического состояния подводных переходов.....	109
4.2 Суть варианта кластерного анализа при моделировании технического состояния подводных переходов .....	111
4.2.1 Концепция кластеризации подводных переходов .....	112
4.2.2 Формирование целевой выборки данных характеризующих подводные переходы.....	118
4.2.3 Предварительный анализ целевой выборки данных по подводным переходам .....	121

4.3 Анализ достоверности результатов оценки технического состояния .....	123
4.3.1 Анализ изменения технологических параметров .....	123
4.3.2 Анализ изменения косвенных параметров .....	125
4.3.3 Тонкая настройка модели прогнозирования (повышение достоверности прогнозирования) .....	126
4.4 Формирование рекомендаций по техническому обслуживанию и ремонту .....	126
4.4.1 Концепция планирования сроков мероприятий технического обслуживания и ремонта .....	127
4.4.2 Оптимизация группировки ПП при планировании технического обслуживания и ремонта .....	127
4.4.3 Планирование сроков и состава технического обслуживания и ремонта подводных переходов .....	129
4.4.4 Разработка оптимальных планов по срокам и составу технического обслуживания и ремонта .....	130
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	149

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы.**

Аварийность магистральных нефтепроводов России признается среди 22 мировых трубопроводных компаний, как одна из самых низких - 0,04 аварий на 1 тысячу км в год. Тем не менее, неизбежность аварий пока ещё существует и поэтому, необходимо не только поддерживать достигнутый уровень, но и неуклонно его снижать на основе точной технической диагностики и последующих ремонтно-восстановительных мероприятий. Одним из наиболее потенциально опасных элементов линейной части магистрального нефтепровода (ЛЧ МН) является подводный переход (ПП). Авария на подводном переходе вызывает не только значительные материальные потери, но и наносит огромный экологический ущерб, поскольку нефть сразу попадает в самую ранимую составляющую окружающей среды - воду. На 78 тыс. км линейной части нефте- и нефтепродуктопроводов приходится 1478 подводных переходов общей протяженностью примерно 3209 км между секущими задвижками. Обеспечение надлежащего технического состояния, отвечающего требованиям нормативной документации, представляет собой масштабную задачу, усугубленную солидным средним возрастом переходов. Основопологающей базой для выполнения мероприятий по обеспечению требуемого технического состояния подводных переходов является оценка технического состояния (ОТС), включающая обследование ПП, применение математических моделей и цифровых технологий для обработки результатов обследования и получения характеристик текущего состояния, прогнозирования следующего обследования, а также остаточного ресурса данного перехода. Существующие методы и нормативы, принятые и установленные в отрасли трубопроводного транспорта, являются осредненными, в то время как каждый переход представляет собой уникальный объект с соответствующими ему характеристиками. Не учет данного обстоятельства может привести и приводит к неадекватным решениям и обуславливает возникновение аварийных ситуаций на производственных объектах.

В условиях реализации национальной программы внедрения цифровых технологий, появилась возможность привлекать обширный массив данных, который может быть целенаправленно использован для разработки моделей оценки технического состояния подводных переходов с высокой достоверностью.

Таким образом, повышение точности оценки технического состояния ПП с одновременным снижением ее стоимости продолжают оставаться на повестке дня.

### **Степень разработанности.**

Вопросами проектирования, строительства и эксплуатации подводных переходов магистральных трубопроводов занимались следующие авторы: Азметов Х.А., Березин В.Л., Березин Л.В., Бородавкин П.П., Быков Л.И., Галюк В.Х., Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Дудников Ю.В., Забела К.А., Идрисов Р.Х., Кульбей А.Г., Левин С.И., Мансуров М.Н., Мугаллимов Ф.М., Мустафин Ф.М., Спектор Ю.И., Черняев В.Д., Шаммазов А.М., Шадрин О.Б.

Вопросы оценки технического состояния ПП нефтепроводов и ее совершенствования нашли отражение в работах Березина Л.В., Гумерова А.Г., Гумерова Р.С., Идрисова Р.Х., Кульбея А.Г., Мугаллимова Ф.М., Шаммазова А.М. и других авторов.

Творческое осмысление результатов теоретических разработок ученых научно-исследовательских и проектных институтов (в частности ВНИИСПТНефть, Гипротрубопровод и др.), опыт технической эксплуатации многочисленных подводных переходов и проведения внешнего обследования и внутренней диагностики (например, данные как организации Волжский подводник и др.) позволили реализовать комплексный подход повышения долговечности и эффективности подводных переходов. Этому послужили многочисленные руководящие документы (регламенты, строительные нормы, правила и т.д.), в которых широко были использованы теоретические результаты исследований прочности оболочечных конструкций, одним из примеров которых являются трубопроводы. Для характеристики технического состояния действующих переходов в целях прогнозирования их остаточного ресурса (время безопасной

работы данного подводного перехода) в качестве базовых исходных данных использовались результаты обследования реальных переходов.

Для описания технического состояния подводных переходов, авторами предлагались и использовались различные модели ПП. Реализовывался следующий принцип развития исследований в данном направлении: чем больше факторов учитывает модель, тем точнее прогнозирование остаточного ресурса.

Проблема состоит в том, что обработка получаемой информации с применением математических и алгоритмических моделей приносит погрешность в итоговый результат (прогнозирование периодов безопасной и безаварийной эксплуатации). Накопление получаемых погрешностей влияет на окончательный результат расчета сроков жизненного цикла ПП. До настоящего времени, данной проблематике не уделялось должного внимания.

### **Идея работы.**

Обоснование перехода от сложных академических моделей к простым эмпирическим моделям и к моделям обработки большой базы неструктурированной информации.

**Цель работы** – Совершенствование методов моделирования технического состояния подводного перехода на основе использования простых эмпирических моделей и алгоритмов обработки большой базы данных для прогнозирования его остаточного ресурса в эпоху внедрения цифровых технологий.

### **Задачи исследования:**

1. Анализ публикаций и факторов, определяющих работоспособность и эффективность эксплуатации подводных переходов магистральных нефтепроводов.
2. Установление характеристик, поиск и анализ промышленных исходных данных для оценки технического состояния подводных переходов и его прогнозирования.
3. Поиск и анализ применимости вариаций моделирования технического состояния подводных переходов.

4. Разработка алгоритма применения математических моделей технического состояния ПП магистральных нефтепроводов для формирования рекомендаций по снижению влияния факторов, определяющих стоимость, состав и сроки проведения обслуживания и ремонта для дальнейшего использования в компаниях отрасли.

#### **Соответствие паспорту специальности.**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности ВАК РФ 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: п. 2 – «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии».

#### **Научная новизна:**

1. Установлено, что во многих случаях применение простых эмпирических моделей позволяет снизить относительную погрешность результата по сравнению с вариантом применения сложных академических моделей, и, в частности, при оценке технического состояния подводных переходов это снижение может достигать 4-х раз.

2. Разработан алгоритм использования узконаправленных кластеров близких по характеристикам подводных переходов, позволяющий уточнить и удешевить решения, принимаемые на основе обработки больших объемов базы данных неструктурированной информации с применением цифровых технологий.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Усложнение математических моделей для оценки технического состояния объекта не приводит к адекватному повышению точности определения характеристик текущего состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

2. Применение простых эмпирических моделей с использованием результатов статистической обработки большой базы данных по характеристикам технического состояния снижает относительную погрешность их определения, в



том числе и за счет применения алгоритма оптимизации ореола кластеризации контролируемых переходов и их параметров.

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач производилось в соответствии с общепринятой методикой выполнения научных исследований, включающей обобщение и анализ предшествующих исследований, разработку рабочих гипотез и концепций, аналитические исследования, разработку численного эксперимента и его методического обеспечения. Теоретические исследования включали применение многомерного статистического анализа, в т.ч. методы кластерного анализа, математического моделирования для формирования информационно-аналитической системы объекта, современные методы обработки информации.

**Степень достоверности и апробации результатов.**

Основные результаты и научные положения диссертационной работы были доложены на: 64, 65, 66, 67-й научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, 2013, 2014, 2015, 2016 г.г), VIII, IX, X, XI Международных учебно-научно-практических конференциях «Трубопроводный транспорт – 2012, 2013, 2015, 2016» (Уфа, УГНТУ), Международной молодежной научной конференции «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса», (Уфа, БашГУ, 2016), 50, 54 Межрегиональный вебинар имени проф. И. Н. Андропова «Актуальные вопросы транспорта нефти и газа» (Ухта, УГТУ, 2020, 2021).

В диссертационной работе были корректно использованы соответствующие математические методы и формулы, вычислительные программные комплексы. Достоверность научных положений и полученных результатов исследований подтверждаются использованием реальных фактических данных.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

Показано, что тенденция повышения сложности математических моделей технического состояния трубопроводов, обусловленная увеличением числа учитываемых влияющих факторов может привести к возрастанию накопленной

погрешности и, напротив, формирование информационно-аналитической системы для построения простых эмпирических индивидуальных моделей для каждого ПП будет способствовать существенному повышению точности определения сроков очередного обследования и прогнозирования остаточного ресурса.

Разработан алгоритм для построения математических эмпирических моделей, учитывая погрешности определения исходных параметров с точки зрения робастности и чувствительности модели.

Установлены и обоснованы методы моделирования технического состояния ППМН за счет принципа кластерной группировки по однородности объектов и влияющих факторов на всем жизненном цикле.

**Практическая значимость работы** определяется тем, что:

Результаты исследований могут быть использованы для определения срока следующего обследования подводного перехода и прогнозирования его остаточного ресурса работы, для планирования мероприятий технического обслуживания и ремонта, что будет способствовать уменьшению аварийности, а, следовательно, снижению расходов на эксплуатацию подводных переходов;

Внедрены результаты научной работы в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГНТУ»:

- включены в программу дисциплины «Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли. Методы математической физики» при подготовке магистров;
- включены в программу дисциплины «Математическое моделирование процессов при транспорте и хранении углеводородов» при подготовке бакалавров по направлению «Нефтегазовое дело»;
- разработано и используется учебно-методическое пособие «Создание математических моделей технического состояния трубопроводов на основе принципов кластеризации».

Результаты исследований диссертационной работы использованы для разработки технических решений при реализации Крупного проекта «Газ Ямала»

ООО «Газпромнефть-Развитие» и включены в требования по мониторингу и эксплуатации производственного объекта Компании.

**Сведения о публикациях автора:** по теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 4 – в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 149 страниц, 2 приложения, 21 рисунок, 26 таблиц, список литературы из 133 наименований.

**Личный вклад автора** заключается в выполненном сборе производственных данных по эксплуатации ППМН и анализ результатов ранее опубликованных материалов по теме диссертации; сформулированы цели и задачи исследований; рассмотрены факторы, определяющие работоспособность и эффективность эксплуатации ППМН; исследованы источники информации для создания моделей оценки технического состояния подводных переходов и его прогнозирования; на основе моделирования коррозионного износа трубопровода и малоцикловой усталости подводного перехода предложены математические модели прогнозирования долговечности (остаточного ресурса) подводного перехода; рассмотрено повышение достоверности математических моделей оценки технического состояния подводных переходов и предложены рекомендации по составу и срокам проведения технического обслуживания и ремонта.

## **ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

Под работоспособностью (работоспособным состоянием) понимается состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и проектной документации [51, 84-90].

Под эффективностью эксплуатации подводных переходов магистральных нефтепроводов (ППМН) в данной диссертации будем понимать достижение необходимого уровня надежности с минимальными затратами.

### **1.1 Характеристика и обеспечение требуемого технического состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов**

Техническое состояние объекта – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды, значениями параметров, установленных технической документацией на объект [7,8, 11, 49, 123].

Особое внимание при обеспечении требований экологической безопасности и повышения надежности трубопроводов уделяется подводным переходам, как наиболее опасным и труднодоступным объектам магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Суммарная протяженность 1478 подводных переходов нефтепроводов ПАО «Транснефть» через реки составляет 3209 км-примерно 4% от общей длины магистралей). Протяженность отдельных подводных переходов достигает несколько километров. Общая протяженность 6606 переходов через малые водотоки оценивается в 1351 км.

Самые сложные в эксплуатации – глубоководные переходы. На них расстояние от верхней образующей трубопровода до зеркала реки – 25 и более

метров. Всего таких переходов на нефтепроводной сети около 40, больше всего – в Волго-Камском бассейне и на реках Сибири. Около 70% переходов проложены траншейным методом, в том числе через крупнейшие реки России (Обь, Волга, Кама и др.). По данным Ростехнадзор (Росатомнадзор) за последние 20 лет из общего числа возникших аварийных ситуаций на магистральных нефтепроводах 11% приходится на подводные переходы.

Результаты оценки технического состояния являются основанием для безопасной эксплуатации, которые формируются из комплексного анализа внутренней и внешней диагностики [13, 20].

Последние выполняются с использованием приборов и, в необходимых случаях, водолазного обследования [11, 31, 44, 55, 62, 125].

В настоящее время на линейной части магистральных нефтепроводов выделяют два вида подводных переходов через водные преграды.

К подводным переходам через водные преграды относится ЛЧ МН с сооружениями, проходящая через водные преграды шириной по зеркалу воды в межень 10 м и более и глубиной 1,5 м и более или шириной по зеркалу воды в межень 25 м и более, независимо от глубины.

К подводным переходам через малый водоток относится ЛЧ МН, проходящая через водоток или водоем шириной по зеркалу воды в межень меньше 25 м и глубиной менее 1,5 м, или шириной по зеркалу воды в межень 10 м независимо от глубины.

В диссертации рассматриваются ППМН через водные преграды.

В состав ППМН через водную преграду входит участок ЛЧ МН пересекающий преграду и установленные на данном участке оборудование и сооружения, например, запорная арматура, вантуза, колодцы контрольно-измерительных приборов (КИП), камеры пуска-приема средств очистки и диагностики (КПП СОД), инженерно-технические сооружения и др.

В понятие подводного перехода включается участок линейной части, проходящий через реку, озеро, водохранилище и другие водные акватории. Длина

его ограничивается двумя задвижками, находящимися в районе поймы. Этот участок линейной части подразделяют на русловой и пойменный:

- русловая часть подводного перехода, это ложе, образованное водным потоком, по которому происходит движение воды без затопления поймы. Он характеризуется средним уровнем воды в межень;

- пойма – это часть подводного перехода, ограниченная с одного крайнего сечения средним уровнем воды в межень, другим крайним сечением на расстоянии 100 метров от уреза воды при меженном уровне.

По результатам работ технического обслуживания (ТО), выполняемых в процессе эксплуатации перехода, районные нефтепроводные управления (РНУ) и организации системы «Транснефть» (ОСТ) составляют акты, заполняют эксплуатационные и технические документы в соответствии с нормативно-технической документацией, которые заносятся в разделы электронного паспорта подводного перехода [67, 68, 69, 71, 72].

РНУ и ОСТ должны хранить проектную и исполнительную документацию на ППМН в течение всего срока эксплуатации и как минимум один раз в три года сообщать координаты пролегания подводных переходов через судоходные реки в заинтересованные ведомства.

Обследование подводных переходов выполняется для определения их технического состояния. Требования к проведению обследования ППМН включают следующие мероприятия:

- планирование и организация работ по обследованию подводных переходов;

- требования к организациям, выполняющие диагностику ППМН;

- перечень работ при периодической диагностике ППМН;

- периодичность и продолжительность проведения обследований ППМН, их границы;

- требования к отчетной документации по результатам обследований переходов ППМН.

Для эксплуатируемых подводных переходов ППМН устанавливается их периодическое обследование [28, 67,71].

Выполнение мониторинга подводного перехода способствует осуществлению контроля его технического состояния, а также следит за динамикой развития русловых процессов на водной преграде [28, 67,71]. В работах [106, 108] рассмотрены общие вопросы мониторинга подводных переходов и автоматизированного мониторинга коррозионного состояния подводных переходов.

При проведении работ по обследованию переходов через водные преграды существуют требования к погрешности измерений, приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Виды работ и требования к погрешности измерений, проводимых при обследовании подводных переходов

№ п/п	Вид работ по обследованию	Предельная погрешность измерений
1	2	3
1	Определение планово-высотного положения (ПВП) ППМН	Определение планового положения подземных коммуникаций должно осуществляться с точностью не более 0,7 мм. Определение глубины заложения проводится дважды. Расхождение с данными полевых измерений и данными, полученными при контрольном шурфовании, не должно превышать 10 %
2	Определение состояния опорной геодезической сети	Точность внутренней сети должна соответствовать точности полигонометрии 1 разряда в плане и нивелированию IV класса по высоте.

		Точность внутренней сети, включающей реперы на КПП СОД, должна соответствовать точности полигонометрии 4 класса в плане и нивелированию II класса по высоте
3	Определение планового положения твёрдых контуров	Определение планового положения твёрдых контуров должно осуществляться с точностью не более 0,5 мм. В горных и залесённых районах – 0,7 мм. Ошибка взаимного положения твёрдых контуров не должна превышать 0,4 мм плана
4	Съёмка рельефа	Средние погрешности съёмки рельефа и его изображения на инженерно-топографических планах относительно ближайших точек съёмочного обоснования не должны превышать от принятой высоты сечения рельефа: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1/4 сечения при основных углах наклона местности до 2°;</li> <li>- 1/3 сечения при углах наклона от 2° до 10° (для планов масштабов 1:1000 и 1:500)</li> </ul>
5	Гидрографическая съёмка	Независимо от способов измерения и установленной подробности промера глубины отсчитываются с точностью: ±0,1 м при глубинах до 10 м;



		<p><math>\pm 0,2</math> м при глубинах от 10 до 20 м;  <math>\pm 0,5</math> м при глубинах свыше 20 м</p>
6	Определение уровня воды	<p>Наблюдения на уровне поста проводятся с точностью до 1 см; при волнении эта точность достигается путем отсчетов нескольких высших и низших положений уровня и вывода средней величины или применением водомерной рейки с успокоителем</p>
7	Определение отметки уровневого поста	<p>Отметка определяется с точностью нивелирования IV класса, т. е. <math>\pm 20 \sqrt{L}</math> мм, где <math>L</math> – длина хода, км</p>
8	Определение скорости течения	<p>Относительная погрешность вертушки при измерении скорости водного потока, %:</p> <p>а) с лопастным винтом диаметром 70 мм</p> $d_v = \pm [0,015 + 0,002(5/V - 1)] \cdot 100,$ <p>где <math>V</math> – измеренная скорость водного потока вертушкой с лопастным винтом диаметром 70 мм;</p> <p>б) с лопастным винтом диаметром 120 мм</p> $d_v = \pm [0,015 + 0,004(5/V - 1)] \cdot 100$ <p>где <math>V</math> – измеренная скорость водного потока вертушкой с лопастным винтом диаметром 120 мм.</p> <p>Диапазон измерения скорости течения комплексом гидрологическим ГРС-3:</p>

		- от 0 до 250 см/с, погрешность $\pm(2,5+0,02V)$ ; - от 0 до 800 см/с, погрешность $\pm(2,5+0,03V)$
9	Определение ПВП (нивелирование) КПП СОД и задвижек основной, резервной нитки и перемишки	Предельные отклонения в плане определяются с точностью полигонометрии 2 разряда, погрешность линейных измерений не должна превышать 1/5000. Предельные отклонения по высоте определяются классом точности III класса и не должны превышать величины допустимых погрешностей вертикальных – 5 мм

Перечень полевых работ в составе периодического обследования подводного перехода включает [28, 113]:

а) Выявление эрозии русловой и береговых частей в месте подводного перехода.

Пример фактических данных о русловых процессах и планово-высотных деформациях руслах в районе ПП приведен в работе [110].

б) определение состояния долговременных реперов, состояния информационно-опознавательных знаков и указателей защитных сооружений и оборудования, в том числе наличие и визуальный контроль вантузов и узлов отбора давления, состояние герметизирующих манжет (при прокладке трубопровода «труба в трубе»), состояние технологических колодцев (при прокладке трубопровода способом «микротоннелирование»), контроль наличия избыточного давления (на резервных нитках ППМН);

в) определение состояния опорной геодезической сети;

г) топографическая съёмка береговых (пойменных) участков в границах обследования;

д) организация временного водомерного поста и наблюдение на водомерном посту на период обследования русловой части (при отсутствии стационарного водомерного поста);

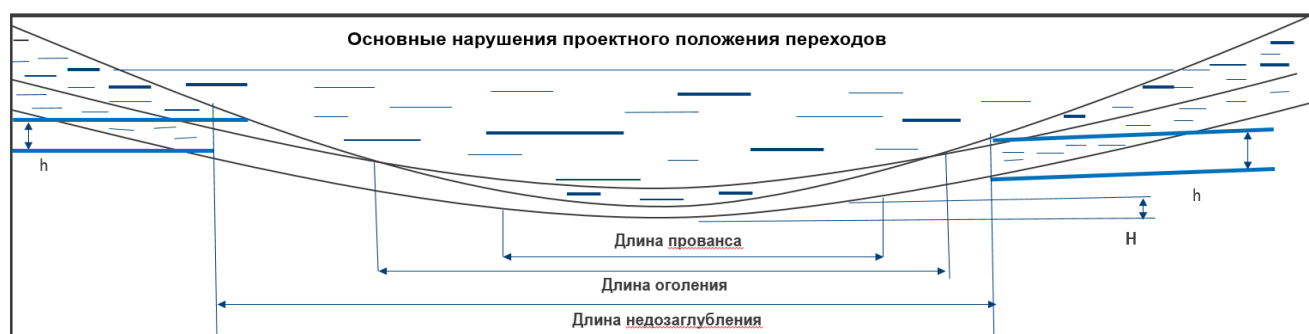
е) фиксация глубины заложения трубы перехода в характерных точках рельефа;

ж) фиксация недозаглубленных, оголенных, провисающих русловых участков:

- с длиной участка до 10 м – через 1 м;
- с длиной участка от 10 до 50 м – через 2 м;
- с длиной участка более 50 м – через 5 м.

з) выявление сложных грунтовых условий;

и) контроль реального положения русловой части подводного перехода путем водолазного обследования. Характеристики провиса, оголения, недозаглубления представлены на рисунке 1.1;



$H$  – максимальная величина провиса;

$h$  – минимальная нормативная толщина защитного слоя

Рисунок 1.1 – Длины провиса, оголения, недозаглубления

В работе выполнено сравнение вариантов балластировки подводных переходов одиночными пригрузами и сплошным обетонированием, которая показала незначительное расхождение их параметров [99];

к) масштаб гидрографической съемки должен быть следующий:

- 1) при ширине зеркала русла (ШЗР) до 1000 м – 1:500;
- 2) при ШЗР более 1000 м – 1:1000.

Расстояние между галсами для масштаба 1:500 не должно превышать 10 м, для масштаба 1:1000 – 20 м;

л) гидролокационная съемка дна водотока (водоема) выполняется в период открытого русла. Снимки гидролокатора бокового обзора, выполненные на смежных галсах, должны иметь зону перекрытия не менее 20 м;

м) измерение характеристик гидрологии водотока:

- 1) определение геометрического уклона поверхности воды;
- 2) определение скорости течения поверхностной и подземной воды, а

также фиксация направления течения;

н) установление грунтовой характеристики элементов водного потока, особенно в местах подмыва и обрушения. Осуществление отбора проб (со дна и берега) в следующих соотношениях:

- 1) при ШЗР до 500 м – от семи до 10 проб;
- 2) при ШЗР от 500 до 1000 м – от 10 до 15 проб;
- 3) при ШЗР свыше 1000 м – от 15 до 25 проб;
- 4) отбор проб грунта проводится не реже одного раза в 5 лет;

о) гидроморфологическое обследование участка реки выше и ниже створа перехода – только для ППМН, трубопровод которых расположен выше профиля предельного размыва русла (ППРР) на реках с интенсивным и умеренным характером русловых процессов, имеющих отклонения заглубления трубопровода от нормативного, либо при отсутствии отклонений заглубления трубопровода от нормативного с выявленной динамикой изменения толщины защитного слоя грунта в сторону снижения (по результатам трех последних обследований). Необходимость выполнения и объем работ определяется на стадии формирования ТЗ по результатам предыдущих обследований, исходя из индивидуальных

особенностей водотока. При гидроморфологическом обследовании проводятся следующие виды работ:

- 1) масштаб гидрографической съемки должен быть следующий
  - при ШЗР до 1000 м – 1:500;
  - при ШЗР более 1000 м – 1:1000 и гидролокационная съемка дна на

судоходных реках и водоемах в период открытого русла;

- 1) измерения определение скорости течения поверхностной и подземной воды, а также фиксация направления течения. Определение расходных характеристик потока.

На примере подводного перехода магистрального нефтепровода «Салават-Орск» через реку Белая изложена методика расчета обеспеченных расходов воды обследуемого перехода [102];

- 2) изучение грунтов дна и берегов русла (при подмывах и обрушениях) с отбором донных и береговых проб с привязкой (координацией) мест отбора:

- при ШЗР до 500 м – от семи до 10 проб;
- при ШЗР от 500 до 1000 м – от 10 до 15 проб;
- при ШЗР свыше 1000 м – от 15 до 25 проб;

- п) Обработка данных полевых работ, составление отчета.

При периодическом обследовании подводного перехода магистрального нефтепровода выполняются следующие камеральные работы:

- сбор и анализ материалов периодических обследований и ремонтных работ за последние 5 лет (не более трех последних технических отчетов), анализ проектной и исполнительной документации;

- сбор, систематизация и анализ материалов исследований гидрологического режима реки или малого водотока прошлых лет, режимной гидрометеорологической информации;

- анализ технического состояния береговых участков, информационных и опознавательных знаков, долговременных реперов, берегоукрепительных сооружений, защитных сооружений;

- анализ и обобщение результатов проведенного периодического обследования, окончательная камеральная обработка материалов с составлением текстовых и графических приложений в составе технического отчета;

- составление топографического плана, совмещенного с русловой съемкой, с нанесенными съемочными и промерными точками, береговой линией, линией тальвега, водомерным постом, гидроствором, морфоствором, трассой магистрального трубопровода с указанием пикетажа и глубины заложения трубопровода, указателями маркерных пунктов ВТД, информационно-предупреждающие знаками, долговременными реперами, оборудованием перехода, технологических трубопроводов и перемычек, защитными сооружениями;

- составление профиля перехода магистрального трубопровода (МТ), нанесение на него проектного (при наличии данных в автоматизированной информационной системе подводных переходов (АИСПП)) и фактического положения трубопровода, данных гидрометеорологических, гидрологических, грунтовых исследований;

- оценка и прогноз русловых деформаций в створе ППМН;

- определение технического состояния русловых и береговых участков, берегоукрепления, обваловок запорной арматуры, КПП СОД, наличие и состояние информационных знаков и долговременных реперов, наличие и состояние вантузов и узлов отбора давления, информация по оголениям и провисам трубопровода, герметизирующих манжет (при прокладке трубопровода «труба в трубе»), состояния технологических колодцев (при прокладке трубопровода способом «микротоннелирование»);

- построение 3D-модели визуализации рельефа с нанесением пространственного положения трубопровода в русловой части перехода для всех ППМН, имеющих отклонения от нормативных значений ПВП трубопровода;

- составление при необходимости рекомендаций по приведению ППМН в нормативное состояние;

- составление технического отчета по обследованию.

Период проведения обследований подводных переходов приведен в таблице 1.2.

Если при строительстве, замене или ремонте производились земляные работы в русловой части, первичное обследование выполняется в период не ранее, чем через 1 год, но не позднее чем через 2 года после ввода ППМН в эксплуатацию.

Таблица 1.2 – Периодичность проведения обследования подводных переходов.

№ п/п	Характеристика ППМН	Периодичность обследования		
		Характер русловых процессов	При отсутствии отклонений ПВП трубопровода от нормативного состояния по данным обследования	При наличии отклонений ПВП трубопровода от нормативного состояния по данным обследования
1	2	3	4	5
1	Переходы МТ, построенные способом траншейной укладки, ННБ и микротоннелирования	Интенсивный	1 раз в 2 года	Ежегодно
		Умеренный	1 раз в 4 года	1 раз в 2 года, но не более срока, назначенного ОТС по анализу русловых процессов и ПВП трубопровода
		Стабильный	1 раз в 6 лет	1 раз в 3 года, но не более срока, назначенного ОТС по анализу русловых процессов и ПВП трубопровода
2	Переходы МТ через малые водотоки		1 раз в 6 лет	1 раз в 3 года
3	Переходы МТ, выведенные из эксплуатации (консервация)		1 раз в 6 лет и перед вводом в эксплуатацию	
<p>Примечание – Обследование проводится в указанный период, но не позднее, чем за 6 месяцев до окончания срока безопасной эксплуатации ППМН, полученного в результате анализа русловых процессов и плано-высотного положения трубопровода. Срок безопасной эксплуатации назначается по ОТС.</p> <p>Характер русловых процессов определяется по следующим значениям:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- интенсивный – <math>C_p &gt; 2</math>, или <math>A_m &gt; 2</math>, или <math>B_m &gt; 1,5</math>;</li> <li>- умеренный – <math>0,5 \leq C_p \leq 2</math>, или <math>1 &lt; A_m \leq 2</math>, или <math>0,5 \leq B_m \leq 1,5</math>;</li> <li>- стабильный – <math>C_p &lt; 0,5</math>, <math>A_m \leq 1</math>, <math>B_m &lt; 0,5</math>.</li> </ul>				

Первичная документация при проведении обследования ППМН представляет собой акт обследования ППМН, а окончательная документация – технический отчет по обследованию ППМН с приложениями (в бумажном и электронном виде).

Эксплуатация ППМН без проведения первичной ВТД со сроками эксплуатации более трех лет с момента её начала не допускается. Характеристики и основные работы по проведению диагностики подводных переходов на примере перехода магистрального нефтепровода Салават-Орск через реку Белая представлены в работе [102]

Периодичность проведения ВТД эксплуатирующихся подводных переходов рассчитывается организацией системы «Транснефть» в соответствии с нормативной документацией, в соответствии со следующей классификацией выявленных дефектов:

- с периодом срока эксплуатации от 2 до 8 лет;
- то же с 7 месяцев до 2 лет;
- то же от 2 до 7 месяцев;
- то же до 2 месяцев;
- дефекты, которые уменьшают рабочее давление до величины, ниже проектного значения.

При анализе также выполняется разделение дефектов, имеющих в русловой и пойменной части.

Оценке технического состояния и эксплуатационной надежности и определению срока безопасной эксплуатации подводных переходов магистральных нефтепроводов подлежат все эксплуатируемые переходы независимо от сроков их ввода в эксплуатацию.

Целью проведения оценки технического состояния является определение соответствия технического состояния перехода МТ требованиям действующей НД и определение срока его дальнейшей безопасной эксплуатации:

- техническое состояние перехода МТ определяется результатами:
- периодических обследований перехода ППМН;
- ВТД;
- диагностирования (технического освидетельствования) запорной арматуры;



- диагностирования (технического освидетельствования) КПП СОД;
- диагностирования (технического освидетельствования) дренажных емкостей, установленных на узлах КПП СОД;
- диагностирования соединительных деталей, вантузов, отборов давления, бобышек;
- диагностирования перемычек и трубопроводов технологической обвязки КПП СОД;
- диагностирования спиральношовных труб;
- обследования коррозионного состояния и состояния противокоррозионной защиты участка МТ, в состав которого входит обследуемый переход;
- дополнительного диагностического контроля (ДДК) элементов типа «патрубок» и «сварное присоединение».

Каждый из оцениваемых критериев может принимать следующие значения:

- дата в формате «ДД.ММ.ГГГГ» – дата, до истечения которой оцениваемый ППМН имеет назначенный срок безопасной эксплуатации по данному критерию;
- «не определяется» – оцениваемый ППМН не подлежит оценке по данному параметру (данный параметр отсутствует на ППМН);
- «не устанавливается» – срок безопасной эксплуатации по данному параметру не может быть установлен по причине несоответствия предъявляемым требованиям.

Назначаемый срок безопасной эксплуатации ППМН равен наименьшему значению из сроков безопасной эксплуатации по каждому из оцениваемых критериев. Если по результатам оценки технического состояния один или более оцениваемых критериев принимает значение «не устанавливается», то срок безопасной эксплуатации всего такого перехода МТ также не устанавливается.

Результаты оценки технического состояния и эксплуатационной надежности и определения сроков безопасной эксплуатации подводных переходов подлежат

систематизации и обобщению по каждому из оцениваемых параметров каждого ППМН.

## **1.2 Влияние этапов жизненного цикла на техническое состояние подводных переходов**

Комплексный анализ состояния подводных переходов магистральных трубопроводов включает в себя обработку значительного количества данных, таких как: высотное фактическое и плановое положение трубопровода относительно дна, изменение рельефа дна, состояние береговой запорной арматуры и т.д. Для получения этих данных применяются различные методы обследования подводных переходов магистральных нефтепроводов: визуальный контроль, дефектоскопический, инженерно-геодезический, инженерно-геологический и т.д.

В связи с широким распространением информационных технологий появилась возможность систематизировать, хранить и обрабатывать большие информационные массивы. Также широкое распространение получила концепция «жизненный цикл» технической системы. В рамках этой концепции при анализе долговечности системы используется вся информация о ней: от момента принятия решения по её созданию и до вывода системы из эксплуатации. Такой подход позволяет систематизировать весь опыт проектирования, сооружения и эксплуатации объектов, что в свою очередь позволяет разрабатывать и внедрять новые методики расчетов параметров, по которым можно судить о состоянии ПП.

Основой указанного подхода являются "базы данных", которые обеспечивают структурирование, хранение и использование информации.

На основе анализа результатов исследований в контексте жизненного цикла нами предлагается схема решения проблем прочности, ресурса и безопасности подводных переходов на всех стадиях жизненного цикла. Жизненный цикл системы предлагается формировать посредством следующего критерия: каждый

этап жизненного цикла осуществляется организациями соответствующего профиля.

В монографии [126] приведен анализ опыта проектирования, создания и эксплуатации подводных переходов нефтепроводов. Авторы описывают комплекс мероприятий, направленных на безаварийную эксплуатацию ПП и подчеркивают, что высокая надежность этих объектов может быть обеспечена только посредством качественного выполнения всех работ: при проектировании, сооружении, строительстве, приемке в эксплуатации, эксплуатации и аварийно-восстановительных ремонтах. В этой же работе приводится перечень регламентов, действующих в то время и определяющих сроки, состав и требования к качеству работ и правила оформления отчетной документации.

В монографии [64] приводится схема решения проблем прочности ресурса и безопасности трубопроводных систем на различных стадиях жизненного цикла. На основании этой модели жизненный цикл трубопроводной системы может быть представлен как последовательность следующих основных этапов: проектирование, изготовление, сооружение, эксплуатация, ремонт, реконструкция, вывод из эксплуатации.

При этом авторы [64,126] подчеркивают, что основные причины аварий на магистральных трубопроводах в период с 1990 по 2000 гг. связаны с качеством выполняемых работ на различных этапах жизненного цикла:

- 12,4% - заводские дефекты труб и оборудования;
- 4,7% - ошибочные действия эксплуатационного и ремонтного периода;
- 34,7% - внешние воздействия на трубопроводы;
- 24,7 % - нарушения процессов производства работ при сооружении и ремонтных работах, отступление от технических решений;
- 23,5% - коррозионное повреждение труб, запорной и регулирующей арматуры.

Таким образом статистика аварий указывает, что по крайней мере в приведенных ниже этапах жизненного цикла возможны отступления от действующих нормативов:

- изготовление (заводские дефекты труб и оборудования);
- сооружение (внешние физические воздействия на трубопроводы, нарушения норм и правил производства работ при строительстве, отступление от проектных решений);
- эксплуатация - техническое обслуживание и ремонт (ошибочные действия эксплуатационного и ремонтного периода, нарушения норм и правил производства работ при ремонте).

Данные по уровню технического состояния ПП, в т.ч. и по причинам аварий, приводятся различными источниками для разных периодов и сроков эксплуатации, районов прокладки.

Имеющаяся информационная база по причинам аварий, которые уже имели место, и по дефектам, выявленным в последнее время при внутритрубной диагностики ПП и внешнем, в т.ч. и водолазном обследовании, неоднозначна. Большая часть опубликованных данных – это результаты внешнего обследования.

Так, например, по данным [64] результаты обобщения по основным причинам повреждений на подводных переходах газопроводов в 90-х годах прошлого века представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Основные причины повреждений подводных переходов трубопроводов

Основные причины повреждений подводных переходов МГ	Доля от общего количества аварий на переходах, %
В русловой части (60 %)	
Брак СМР	36
Коррозия	2

Размыв трубы с последующим разрывом гидродинамическим напором	7
Всплытие трубы	4
Повреждение судами	7
Неустановленные причины	4
В пойменной части (40 %)	
Брак СМР	22
Коррозия	12
Оползни	2
Неустановленные причины	4

Результаты анализа причин повреждений ПП нефте- и продуктопроводов, имевших место до 2000 года [49] приведены ниже в процентах от общего количества:

- 70 % - деформация русла;
- 12% - механические повреждения якорями судов;
- 7% - потеря устойчивости из-за недостаточной пригрузки;
- 3,5 % - некачественная сварка монтажных стыков;
- 1,5 % - осадка набережной;
- 1,5 % - повреждение льдом;
- 4,5 % - другие причины, включая наружную коррозию трубы, стресс-коррозию и нарушения правил эксплуатации.

Нами была выполнена оценка состояния подводных переходов на основании данных о результатах дефектоскопического контроля трубопроводов с отрицательной плавучестью. Проанализированы данные о состоянии ППМН по результатам их внутритрубной диагностики различными снарядами.

Всего было обследовано 33 подводных перехода (вместе с резервными нитками в средней полосе России) и в результате были обнаружены типы дефектов, которые сгруппированы и представлены в таблице 1.4 и на рисунке 1.1.

Из данных дефектоскопического контроля, представленных в таблице, видно, что наибольшее число составляют дефекты типа вмятин и рисков (на каждый переход в среднем приходится 2 таких дефекта); также велика доля таких дефектов как гофры и аномалии в продольном сварном шве (по 1 на каждый переход), а также дефекты типа потери металла.

Таблица 1.4 – Группы дефектов

№	Наименование дефекта	Количество
1	Аномалия в продольном сварном шве	35
2	Аномалия в поперечном сварном шве	4
3	Вмятина	63
4	Риска	65
5	Потеря металла	16
6	Гофр	33

Характеризуя дефекты с точки зрения этапов жизненного цикла подводного перехода, на этапе изготовления труб отмечаются аномалии в продольном сварном шве, что представляет собой заводской брак.

На этапе строительства - вмятины, гофры, риски, аномалии в поперечном сварном шве которые чаще всего упоминаются в отчетных документах. Численный анализ позволяет сделать вывод о том, что большинство дефектов было заложены на этапе сооружения, а лишь небольшая часть в период эксплуатации. Не стоит исключать возникновение таких дефектов как вмятины, риски, гофры в результате воздействия русловых процессов, подвижек грунта и внешнего воздействия (доля таких дефектов обычно невелика. Рисунок 1.2).

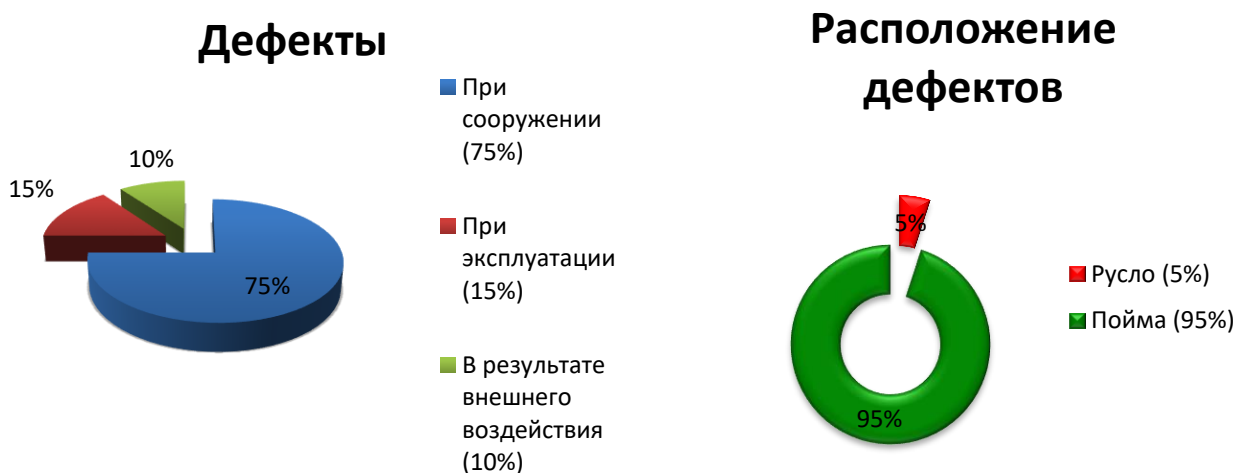


Рисунок 1.2 – Результаты анализа технического состояния ППМН

Что же касается расположения дефектов, то наибольшее их количество сосредоточено в пойме водоемов. Это связано с тем, что пойменные участки трубопроводов чаще всего являются наиболее нагруженными и испытывают большие изгибные напряжения, здесь же наиболее существенно влияние подвижек грунта, поскольку именно в пойме происходит переход от «влажного» грунта к сухому и др.

Выше приведенные данные подводят к такому выводу: для адекватной оценки технического состояния ПП, разработки точных моделей его оценки, а на их базе – разработку системы технического обслуживания и ремонта (ТОР) и осуществление прогнозирования ТС ППМН необходима полноценная информационная база данных по каждому переходу, в соответствии с основными этапами его жизненного цикла.

Это означает, что на основных этапах жизненного цикла ПП, как элемента трубопроводной системы, формируются показатели его надежности и эффективности.

Следует заметить, что и неэффективные решения, принятые на стадии проектирования, снижают проектные показатели надежности. Очевидно так же,

что и на этапе реконструкции неизбежны решения, которые влияют на последующий этап эксплуатации в контексте надежности и эффективности.

В монографии [64] отмечается, что наибольшую тревогу на линейной части вызывает состояние подводных переходов. Авторы указывают, что около 50% этих переходов имеют срок эксплуатации выше 30 лет, в то время как проектный срок эксплуатации этих сооружений составляет 20 лет.

В соответствии с современной терминологией жизненный цикл (ЖЦ) технической системы - это "стадии процесса, охватывающие различные состояния системы, начиная с момента возникновения необходимости в такой системе и заканчивая её полным выводом из эксплуатации" [49].

По определению, все этапы жизненного цикла технической системы (ТС) влияют на показатели ее надежности и эффективности. Следует иметь в виду, что современный этап развития информационных технологий позволяет контролировать очень большой объем информации, необходимой для контроля параметров, в той или иной степени определяющих уровень надежности и эффективности.

Примером технических систем, для которых высокие требования к надежности являются основополагающими, могут служить атомные электростанции, космические системы, авиационные системы и т.п. Эти системы характеризуются, прежде всего, высоким уровнем интеграции научных достижений в инженерно-технические решения, связанные со всеми этапами жизненного цикла. Концепция таких систем представлена на рисунке 1.3.



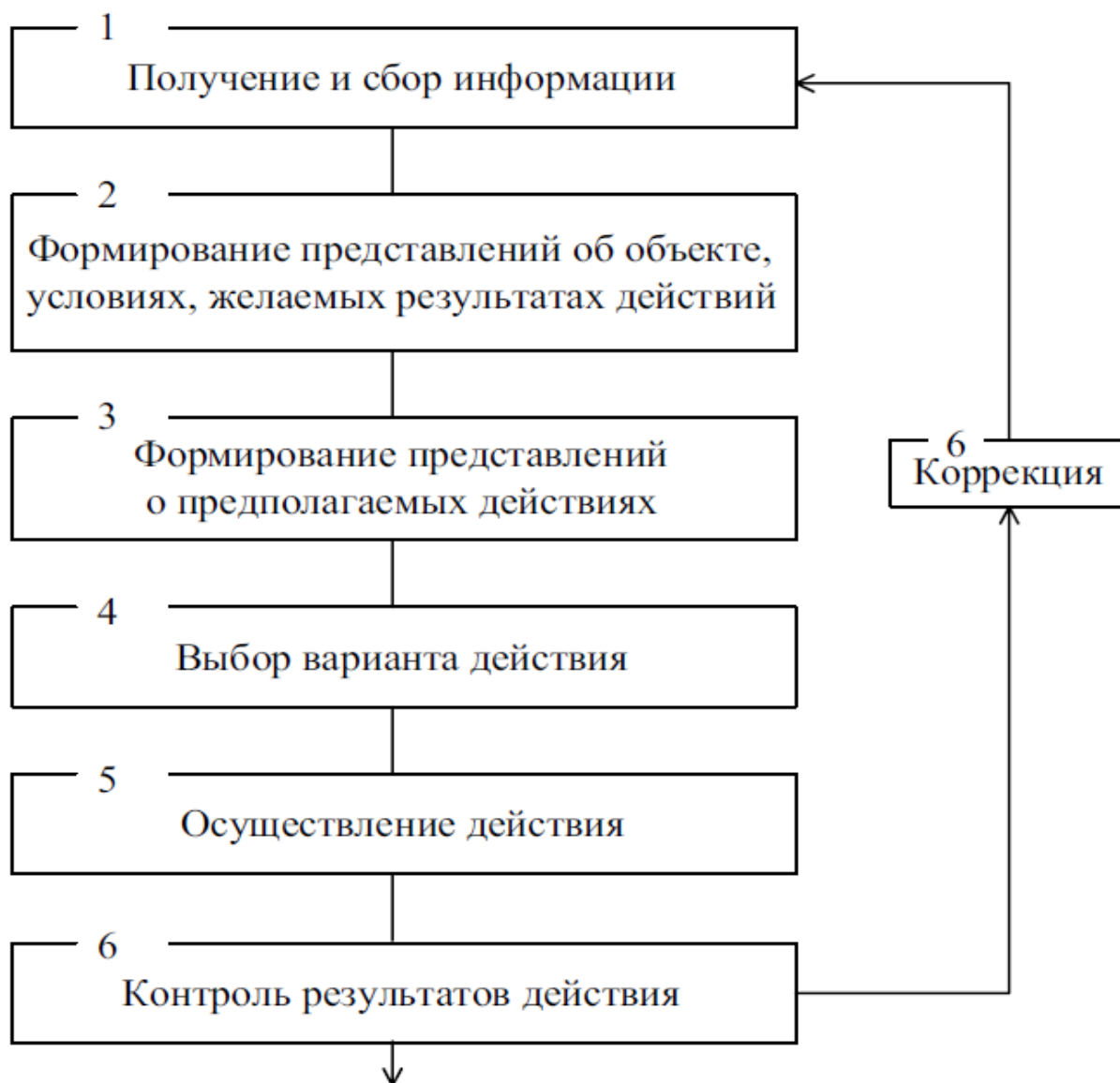


Рисунок 1.3 – Алгоритм управления

Концепция модели управления системами сводится к следующему:

- 1) осуществляется непрерывный контроль доминирующих параметров, определяющих надежность элементов системы;
- 2) разрабатываются модели взаимосвязи входных параметров с параметрами, определяющими уровень надежности системы;
- 3) разрабатывается механизм управления выделенными параметрами;
- 4) формируется система записи и хранения информации о выделенных параметрах и параметрах контекста.

5) указанная информация обрабатывается в научных организациях соответствующего профиля и совершенствуются модели и механизмы, описанные в пп.2...3

б) п.п. 2...5 повторяются на протяжении всего жизненного цикла технической системы.

Указанные выше системы объединяет возможность осуществлять непрерывный контроль доминирующих параметров (см. пп.1). Результаты подобного контроля обрабатываются с использованием тех или иных моделей, а возможность совершенствования моделей с учетом изменения контролируемых параметров (как в совокупности, так и с учетом динамики старения индивидуально каждого элемента системы) обеспечивается степенью полноты имеющейся базы данных.

Для того, чтобы систематизировать всю информацию о состоянии системы и в перспективе использовать ее для совершенствования моделей, применяемых в расчетах, связанных с надежностью и эффективностью трубопроводных систем, необходимо использовать модели жизненного цикла этих систем. Это позволит, кроме всего прочего, хранить и использовать результаты многочисленных наблюдений за техническим состоянием системы трубопроводного транспорта и эффективно проводить научные исследования, направленные на улучшение методов анализа и прогнозирования состояния таких систем с точки зрения надежности и эффективности.

### **1.3 Современное состояние информационного обеспечения создания моделей оценки и прогнозирования технического состояния ПП**

Обеспечение долговечности ПП МН и эффективности использования для этой цели системы ТОР поддерживается выполнением положений серии руководящих и нормативных документов, прежде всего, ПАО «Транснефть» [78-90].

Для контроля технического состояния подводных переходов (ТСПП) магистральных нефте- и продуктопроводов в ПАО «Транснефть» создана автоматизированная информационно-аналитическая система (АИСПП). Она оперирует данными, содержащимися в электронных паспортах каждого подводного перехода. Таким образом, источником информации для формирования документов и отчетов по характеристике и оценке ТСПП в АИСПП является электронный паспорт подводного перехода, который содержит:

- общие сведения о ПП;
- план-схема ПП;
- привязка характерных точек ППМН (ППМНПП);
- требования к план-схеме перехода (текст);
- технологическая схема участков трубопровода;
- экспликация оборудования ППМН (ППМНПП);
- сведения о категории участков трубопроводов;
- катодная защита;
- метеорологические условия в районе ПП;
- среднесуточная температура воздуха;
- абсолютный минимум температуры воздуха (по месяцам) в градусах;
- абсолютный максимум температуры воздуха (по месяцам) в градусах;
- текстовое описание физико-геологических характеристик реки;
- физико-географические характеристики реки, пересекаемой ПП;
- скорость течения при различных уровнях воды: Весеннее половодье;
- скорость течения при различных уровнях воды: Летняя – осенняя межень;
- скорость течения при различных уровнях воды: Зимняя межень;
- описание местоположения ППМН (ППМНПП);
- описание прилегающего участка;
- гидрологические сведения об участке реки в районе ПП;
- водпост;

- характерные уровни и расходы воды;
- уровни воды на ПП;
- совмещенный график уровня воды на ПП;
- описание гидротехнических сооружений в районе ПП;
- гидрометрические измерения на реке в створе ПП;
- план ПП (русловая и топографическая съемка);
- профиль ПП;
- профиль ПП с геологическим разрезом;
- инженерно-геологические изыскания;
- русловые деформации (гидроморфологический анализ руслового процесса);
- каталог координат и отметок геодезических знаков постоянного закрепления ПП;
- сведения об авариях и отказах на ПП;
- проверка задвижек на полное открытие-закрытие, герметичность и промывка задвижек;
- очистка трубопровода;
- сведения о внутритрубной диагностике трубопроводов;
- участки с отклонениями толщины защитного слоя от нормативной;
- оголение, включая провисы;
- провисы;
- выполнение мероприятий по приведению ППМН (ППМНПП) к нормативному состоянию;
- сведения о техническом состоянии и эксплуатационной надежности ПП;
- сведения о капитальном ремонте и техническом обслуживании на ПП;
- измерение защитного потенциала трубопровода, а также некоторые другие сведения, в частности, связанные с локализацией и ликвидацией возможных разливов нефти;

Функционально АИСПП включают шесть подсистем, которые в процессе эксплуатации позволяют выполнять следующие пользовательские операции:

- ведение нормативной, справочной и регламентной информации;
- ведение электронных паспортов ППМН (ППМНПП) в АИСПП;
- планирования работ по диагностике, техническому обслуживанию и обследованию ППМН (ППМНПП) в АИСПП;
- контроль и учет результатов работ по диагностике, техническому обслуживанию и обследованию ППМН (ППМНПП) в АИСПП;
- контроль значений параметров и формирования отчетов АИСПП;
- аудит информационной безопасности АИСПП.

Возможности АИСПП используются для ежемесячной (или по требованию) фиксации сложившегося положения на основании регулярного обновления базы данных (БД) электронных паспортов ППМН путем автоматического импорта изменений паспортных характеристик.

Эксплуатация подсистемы электронных паспортов ППМН со стороны пользователей АИСПП включает только просмотр информации.

АИСПП обеспечивает формирование и анализ отчетов:

- 1) сведения о выполнении сводной программы обследований, диагностических и ремонтных работ подводных переходов нефтепроводов;
- 2) отчёт по перечню ППМН с наличием провиса DN 20 и более;
- 3) отчёт по перечню ППМН с наличием дефектов с просроченным сроком устранения дефектов;
- 4) отчёт о наличии дефектов с предельным сроком эксплуатации до 2х лет для всех ОСТ;
- 5) отчёт по ОСТ с ранжированием по числу неустранимых дефектов;
- 6) отчёт по ППМН со сроком эксплуатации запорной арматуры более 50 лет;
- 7) отчёт по выполнению мероприятий ОСТ по приведению ППМН через водную преграду в нормативное состояние;

8) сведения о техническом состоянии ППМН через водные преграды.

При планировании работ по обследованию ППМН в АИСПП предусмотрена следующая функциональность:

- автоматическое формирование проекта программы обследования ППМН;
- автоматизированное формирование проекта программы обследования ППМН с участием пользователя АИСПП;
- автоматизированное согласование проекта программы обследования ППМН;

При планировании работ по диагностике и техническому обслуживанию ППМН в АИСПП предусмотрено автоматизированное формирование контрольной программы работ.

Программа работ по обследованию ППМН может формироваться АИСПП с автоматическим расчетом сроков или с непосредственным указанием сроков исполнения работ пользователем АИСПП.

Контроль работ по диагностике, техническому обслуживанию и обследованию в АИСПП осуществляется путем постоянного сравнения плановых и фактических дат исполнения в автоматическом режиме с предоставлением соответствующих отчетов как по запросу пользователя АИСПП, так с использованием механизма автоматической рассылки уведомлений.

Характеристика порядка использования АИСПП говорит о том, что основой в этом процессе является нормирование, которое учитывает многие реальные факторы, может быть даже излишние, вносящие погрешности в расчеты и выводы.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Анализ факторов, определяющих эффективность и работоспособность ППМН показал, что в существующей системе определения технического состояния подводных переходов, основой является принцип нормирования, который учитывает многие реальные факторы, может быть даже излишние, вносящие погрешности в расчеты и выводы, для повышения точности расчетов необходима полноценная база данных по каждому переходу в соответствии с этапами его жизненного цикла.

2. Выявлена необходимость совершенствовать информационно-аналитическую систему для повышения эффективности эксплуатации и точности моделирования технического состояния ППМН на всех этапах его жизненного цикла.

3. Основными причинами снижения живучести ПП являются процессы, связанные с воздействиями внешней среды (износ и старение элементов конструкции под воздействием факторов, предусмотренных проектом); отклонения от нормативов и правил производства работ:

- отступления от проектных решений;
- заводские дефекты труб и оборудования;
- дефекты изготовления и монтажа;
- нарушения правил эксплуатационного и ремонтного периодов.

4. Установлено, что наибольшее количество дефектов расположено в пойме водоемов. Это связано с тем, что пойменные участки трубопроводов чаще всего являются наиболее нагруженными и испытывают большие изгибные напряжения, здесь же наиболее существенно влияние подвижек грунта, поскольку именно в пойме происходит переход от «влажного» грунта к сухому и др.

## **ГЛАВА 2 УСТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК, ПОИСК И АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ВЫБОРА СООТВЕТСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЕГО МОДЕЛЕЙ**

### **2.1 Проблемы моделирования технического состояния подводных переходов**

В связи с высокой экологической опасностью ПП, используется большой перечень мероприятий для поддержания безопасной эксплуатации и уделяется особое внимание процессам поддержания пригодного технического состояния и ремонта. Разработана нормативная база по проведению диагностики и интерпретации результатов, созданы требования по проведению ремонтно-восстановительных работ [35, 68-72,78-86].

Как правило, таким регламентам предшествуют широкие исследования с привлечением достижений механики разрушения и теории оболочек. В результате интерпретации результатов обследований ПП формируются выборки исходных данных, на основании которых выбираются те или иные модели, позволяющие адекватно прогнозировать время безопасной работы конкретного перехода [20, 48,49]. Данный подход является классическим и чаще всего приводит к результатам, увеличивающим расходы на техническое обслуживание и ремонт, что обусловлено непреодолимыми до определенного времени проблемами, связанными с большим объемом исходной информации и вычислений.

В настоящее время, в рамках цифровой трансформации процессов отрасли, появилась возможность:

- выполнять самые сложные вычисления;



- использовать в качестве исходной большие объемы неструктурированной информации, что помогает разрабатывать модели прогнозирования индивидуального остаточного ресурса.

Проблема состоит в том, что процесс получения и последующей обработки исходной информации связан с использованием значительного количества математических и алгоритмических моделей, каждая из которых приносит свою долю погрешности в окончательный результат. Эти погрешности накапливаются и могут существенно влиять на результаты расчетов. До настоящего времени этой проблеме не уделялось должного внимания.

Для выполнения расчетов по оценке технического состояния необходима информация о параметрах износа ПП, при этом используются понятия:

- бездефектный участок – участок, на котором не обнаружены дефекты при использовании современных средств и методов диагностики;
- дефектный участок – участок, на котором обнаружены дефекты;
- дефект не обнаружен – участки, на которых при современном уровне развития технических средств и методов диагностики не удалось обнаружить дефекты, но, в соответствии с опытом эксплуатации, высока вероятность их наличия в обследуемой зоне (зона повышенных напряжений, обусловленных конструктивными особенностями ПП).

Необходимо структурировать информацию о дефектах, характерных для ПП, и хронологию их развития для каждого ПП индивидуально, т.к. условия создания, сооружения и эксплуатации каждого конкретного ПП могут существенно различаться. Это зависит от технологического уровня в период изготовления, сооружения и эксплуатации ПП, изменяющихся характеристик водной преграды, климатических условий и т.п.

Кроме того, следует учитывать, что на протяжении жизненного цикла ПП многократно обследуется и подвергается ремонтным и/или восстановительным работам. Вышесказанное приводит, с одной стороны, к увеличению сроков безаварийной эксплуатации, с другой – появляется ценная информация для

проверки качества математических моделей, используемых при принятии решений о сроках безаварийной работы ПП, а это дает возможность учитывать индивидуальные особенности каждого ПП при управлении эффективностью его эксплуатации.

## 2.2 Эволюция классификации дефектов

Причиной возникновения осложнений на ПП являются дефекты, в непосредственной близости от которых образуются зоны, где уровень напряжений может существенно превышать уровень напряжений, предусмотренных при проектировании.

Согласно [36,123], дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией. При классификации дефектов учитывают характер, размеры, место расположения дефекта на ПП и условия эксплуатации.

Основополагающая классификация дефектов подразделяет их на явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные, исправимые и неисправимые:

- критическим является дефект, при котором использование ПП по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности;
- к значительным относятся дефекты, которые существенно влияют на использование продукции по назначению или на ее долговечность, но не являются критическими;
- к малозначительным относятся дефекты, которые не оказывают такого влияния;
- явные поверхностные дефекты определяют визуально, а внутренние, скрытые и поверхностные, не различимые глазом, с помощью специальных средств.

По происхождению дефекты изделий подразделяют на: производственно-технологические, технологические и эксплуатационные. Дефекты первого вида связаны с изготовлением материала и заготовок изделий. Технологические дефекты связаны с изготовлением и ремонтом деталей (сваркой, пайкой, механической обработкой). Дефекты последнего вида возникают после некоторой работы изделия в результате усталости металла деталей, коррозии, изнашивания и т.д., а также неправильного технического обслуживания и эксплуатации. Для каждого периода жизненного цикла характерны специфические дефекты.

На этапе изготовления труб ПП возникают дефекты прокатанного и кованого металла "производственно-технологические":

- разрывы или надрывы металла;
- закаты (закат, образовавшийся от вдавливания заусенца, похож на продольную трещину);
- волосовины (мелкие внутренние или выходящие на поверхность трещины);
- расслоения (нарушения сплошности внутри металла);
- флокены (представляют собой волосные трещины);
- внутренние разрывы; т
- трещины (бывают одиночные и групповые, расположенные беспорядочно или идущие в определенном направлении).

На этапе монтажа возникают дефекты (в том числе дефекты сварки): - риски (царапина, задир); вмятина; гофр; овальность; трещины в зоне сварного шва; горячие трещины в переходной зоне от шва к основному материалу; трещины в наплавленном металле; мелкие трещины (микротрещины) в шве или надрывы по переходной зоне; трещины рихтовочные; непровар; поры и раковины в металле шва; шлаковые включения в металле шва.

Дефекты, возникающие при эксплуатации: трещины усталости, являются наиболее распространенными эксплуатационными; коррозионные поражения.

Вышеперечисленные дефекты, обнаруженные в результате внедрения внутритрубной диагностики линейной части магистральных нефтепроводов ПАО «Транснефть» стали подразделять на дефекты, подлежащие ремонту (ДПР), из которых по степени опасности выделялись дефекты первоочередного ремонта (ПОР).

Дефектами, подлежащими ремонту, являлись дефекты труб, соединительные детали, установленные на магистральных и технологических нефтепроводах, параметры которых не соответствуют требованиям СНиП, ГОСТ, ВСН, и других нормативных документов.

Дефектами первоочередного ремонта являлись дефекты, представляющие повышенную опасность для целостности нефтепровода при его эксплуатации и подлежащие ремонту в первую очередь для восстановления несущей способности трубы.

Комбинированными дефектами являются комбинации из приведенных дефектов. К таким дефектам относятся:

- вмятины и гофры в сочетании с рисккой, потерей металла, расслоением или трещиной;
- овальность в сочетании с вмятиной, гофром;
- вмятины и гофры, примыкающие или находящиеся на сварном шве;
- аномалии сварных швов в сочетании со смещениями;
- аномалии сварных швов в сочетании с коррозионной потерей металла;
- расслоение, примыкающее к дефектному сварному шву.

Дефект считается примыкающим к сварному шву, если минимальное расстояние от границы дефекта до границы сварного шва не превышает 4-х толщин стенки трубы в районе дефекта.

В настоящее время на ППМН принята следующая градация дефектов, используемая в действующей автоматизированной информационно-аналитической системе подводных переходов:

- дефекты с просроченным сроком устранения;

- дефекты с предельным сроком эксплуатации до 2-х лет;
- неустраненные дефекты.

Результаты внешнего обследования свидетельствуют о том, что 60-70% нарушений технического состояния ПП составляют провисы, оголения и недозаглубления. Они не приводят, непосредственно, к разгерметизации нефтепровода и достаточно быстро устраняются. Более опасны с точки зрения утечек нефти дефекты, вызванные коррозионным износом и малоцикловой усталостью (трещины). Поэтому в качестве причин, приводящих к разгерметизации нефтепровода, в первую очередь, будем исследовать дефекты, вызванные коррозией и малоцикловой усталостью, в т.ч. сменой технологических параметров работы нефтепровода.

### **2.3 Требования к качеству исходных данных в системе принятия решений, связанных с надежностью и эффективностью эксплуатации подводного перехода**

Система поддержки принятия решений (СППР) - компьютерная автоматизированная система, целью которой является помощь специалистам, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности [126-130].

В подобных системах предполагается (по умолчанию) высокое качество исходной информации, которая используется в СППР. Это является одним из основных условий формирования объективного заключения о состоянии и перспективах использования рассматриваемой технической системы [12,13,16,17,19,124]. Об этом также говорится в работе, в которой указывается на необходимость информационной поддержки системы управления надежностью и эффективностью подводных переходов магистральных нефтепроводов [95].

Наиболее важными представляются следующие общие качественные свойства информации:

- объективность информации (объективный - существующий вне и независимо от человеческого сознания, объективную информацию можно получить с помощью средства измерения: исправных датчиков, измерительных приборов);

- достоверность информации (информация достоверна, если она отражает истинное положение дел, только достоверная информация помогает принять правильное решение).

Недостоверной информация может возникать по следующим причинам:

- а) преднамеренное искажение (дезинформация);
- б) искажение в результате воздействия помех и недостаточно точных средств фиксации информации;
- в) полнота информации;
- г) точность информации;
- д) актуальность информации;
- е) полезность (ценность) информации.

В контексте решаемой проблемы под качеством информации будем понимать её свойства, перечисленные ниже.

### **Достоверность исходных данных**

Достоверность информации определяется ее свойством отражать реально существующие объекты с необходимой точностью. Применительно к ПП достоверность информации определяется регламентами отрасли (трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов). В предлагаемой базе данных контроль достоверности исходной информации будет осуществляться статистическими методами. Алгоритмическая модель подсистемы контроля достоверности исходной информации будет подробно рассмотрена далее в процессе создания разрабатываемой базы данных.

Экспертная оценка уровня влияния достоверности исходной информации на надежный и эффективный ПП соответствует уровню "высокая". В этой связи, нами проведена оценка возможности повторного получения рассматриваемой

информации, которая в БД оценена как "некачественная»: в случае если имеется возможность повторного получения информации, вновь полученная информация повторно оценивается по критерию "достоверность" и, при положительном решении она заменяет ранее полученную некачественную информацию. При этом в БД формируется признак "информация получена повторно". Если возможность повторного получения недостоверной информации невозможна, или нецелесообразна, осуществляется "восполнение" недостающей (в данном случае "некачественной информации") статистическими методами. Алгоритмическая модель "подсистемы восполнения" исходной информации будет рассмотрена в процессе создания разрабатываемой (БД).

### **Полнота (достаточность) исходных данных**

Достаточность (полнота) исходных данных означает, что она содержит минимальный, но достаточный для принятия правильного решения набор показателей. Как и в предыдущем случае этот показатель определяется регламентами отрасли. Применительно к ПП, как и в предыдущем случае экспертиза полноты исходной информации будет осуществляться статистическими методами. Алгоритмическая модель "подсистемы контроля достоверности исходной информации" будет подробно рассмотрена в процессе создания разрабатываемой базы данных.

Как и в предыдущем случае невыполнения требования полноты приводят к решению или "повторного запроса" или "восполнения" рассматриваемой информации.

### **Репрезентативность информации**

Репрезентативность информации связана с правильностью ее отбора и формирования в целях адекватного отражения свойств объекта. Применительно к ПП, "репрезентативность" в создаваемой БД будет приниматься во внимание в подсистеме "восполнения информации" (см. выше). При этом для анализа репрезентативности достаточно будет использовать известные методы статистического анализа [6,9,24,25,77,123].

### **Актуальность исходных данных**

Актуальность исходных данных определяется степенью сохранения ценности информации для управления в момент ее использования и зависит от динамики изменения ее характеристик и от интервала времени, прошедшего с момента возникновения данной информации. Применительно к ПП актуальность информации определяется регламентами отрасли. Алгоритмическая модель "подсистемы контроля достоверности исходной информации будет подробно рассмотрена в процессе создания разрабатываемой базы данных.

### **Своевременность информации**

Своевременность информации означает ее поступление не позже заранее назначенного момента времени, согласованного со временем решения поставленной задачи. Применительно к ПП своевременность информации определяется регламентами отрасли (трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов).

### **Точность исходных данных**

Точность исходных данных определяется степенью близости получаемой информации к реальному состоянию объекта. Для информации, отображаемой цифровым кодом, известны четыре классификационных понятия точности: формальная точность, измеряемая значением единицы младшего разряда числа; реальная точность, определяемая значением единицы последнего разряда числа, верность которого гарантируется; максимальная точность, которую можно получить в конкретных условиях функционирования системы; необходимая точность, определяемая функциональным назначением показателя. Применительно к ПП достоверность информации определяется регламентами отрасли (трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов).

### **Устойчивость информации**

Устойчивость информации отражает ее способность реагировать на изменения исходных данных без нарушения необходимой точности. Устойчивость



информации, как и требования к другим критериям качества исходной информации определяется регламентами отрасли.

## 2.4 Структура исходных данных, необходимой для управления надежностью и эффективностью эксплуатации подводных переходов

Для того чтобы определить структуру и содержание доступных исходных данных, которые позволят выполнить расчеты показателей надежности и эффективности эксплуатации подводных переходов, а также оценить качества полученных результатов, необходимо разработать функциональную модель "СППР управления надежностью и эффективностью подводных переходов". Такая модель позволит, кроме всего прочего, определить круг задач, которые необходимо решить в рамках рассматриваемой проблемы.

На рисунках 2.1 и 2.2 приведены разработанные в диссертации модели "Информационной поддержки системы управления надежностью и эффективностью эксплуатации подводных переходов (ИСУЭПП)".

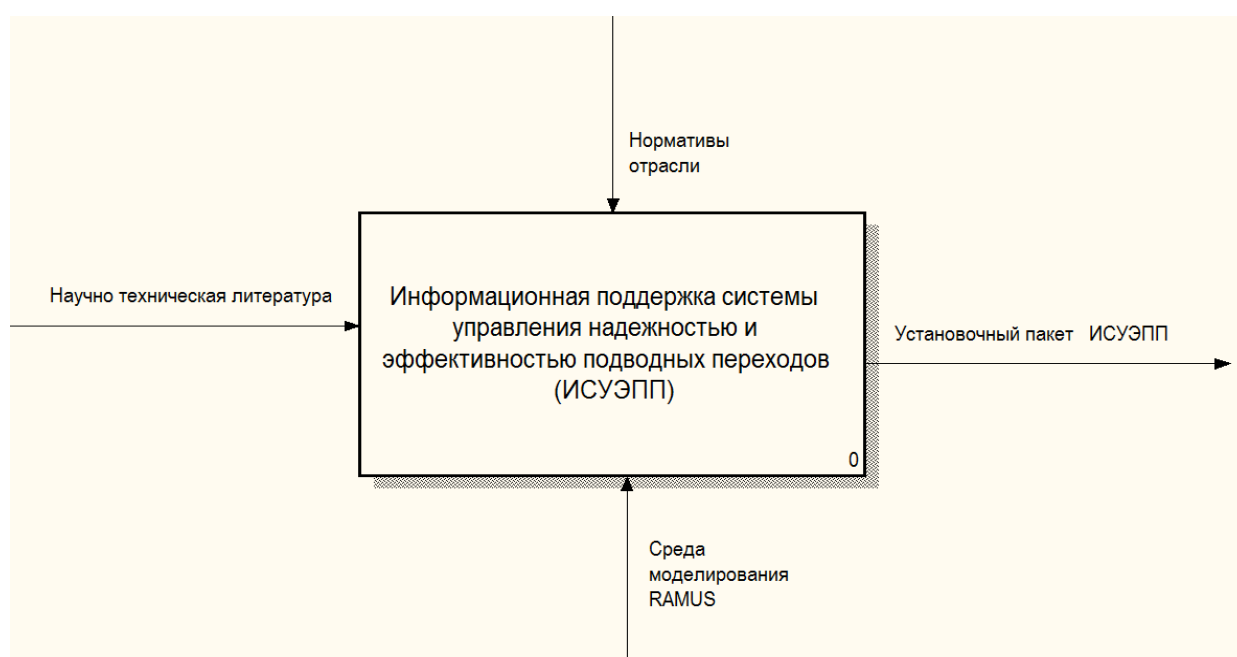


Рисунок 2.1 – Диаграмма информационной поддержки системы управления надежностью и эффективностью верхнего уровня

На данной диаграмме приведены наименования носителей информации, которая используется в процессе разработки ИСУЭПП:

- отраслевые нормативы, которые используются на всех этапах разработки ИСУЭПП в качестве управляющих;
- научно техническая литература, на основании которой формируются алгоритмы принятия решений, связанных с получением информации, ее обработкой и формированием рекомендаций, определяющих надежность и эффективность (основные источники приведены в списке литературы);
- результаты проведенных исследований должны быть представлены установочным пакетом программного комплекса ИСУЭПП.

При выполнении моделирования используется широко распространенные версии среды разработки «RAMUS».

На рисунке 2.2 приведена контекстная диаграмма функциональной модели ИСУЭПП нижнего уровня (декомпозиция процесса разработки системы управления надежностью и эффективностью подводных переходов).

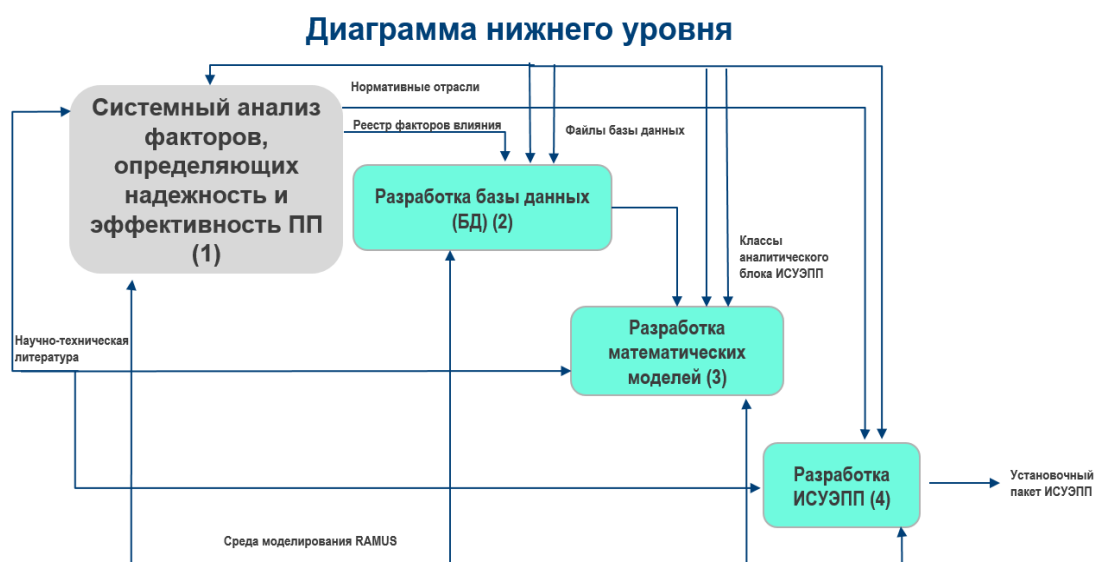


Рисунок 2.2 – Диаграмма нижнего уровня, модели ИСУЭПП

На диаграмме видно, что проблему разработки информационной поддержки системы управления надежностью и эффективностью подводных переходов предлагается представить в виде четырех основных блоков:

- 1) системный анализ факторов, определяющих надежность и эффективность ПП;
- 2) разработка базы данных о факторах, определяющих надежность и эффективность ПП;
- 3) разработка математических моделей, необходимых для выполнения всех промежуточных расчетов и формирования рекомендаций, направленных на повышение надежности и эффективности каждого подводного перехода;
- 4) комплекс информационной поддержки системы управления надежностью и эффективностью.

#### **2.4.1 Разработка базы моделирования оценки технического состояния подводного перехода**

На основании анализа проблемы надежности и эффективности эксплуатации подводных переходов, выполненного в 1-й главе, сделан вывод о необходимости совершенствования информационно-аналитической системы для решения следующих задач:

- хранения информации;
- выполнения необходимых расчетов;
- адаптации математических моделей;
- управления качеством информации и математических моделей, используемых при принятии технических решений, связанных с подводными переходами.

Традиционным методом хранения информации большого объема и сложной структуры являются базы данных. На рисунке 2.2 приведена разработанная нами

диаграмма дерева узлов процесса проектирования базы данных о подводных переходах магистральных нефтепроводов.

На этапе "Описание цели совершенствования информационно-аналитической системы подводных переходов (ИАСПП)" решаются следующие задачи:

- формулируется цель совершенствования ИАСПП;
- производится информационный анализ предметной области;
- производится алгоритмический анализ предметной области.

Рассмотрим подробнее содержание каждой из перечисленных задач.

Цель совершенствования ИАСПП - разработка современной системы принятия решений, связанных с надежностью и эффективностью эксплуатации ПП на всех этапах их жизненного цикла, с учетом доступной информации о техническом состоянии каждого ПП системы магистрального нефтепроводного транспорта России [96, 100, 104].

Информационный анализ предметной области - анализ, структурирование и выбор способов хранения исходной информации о ПП, необходимой для достижения вышеуказанной цели.

При исследовании процесса коррозионного износа в качестве исходной информации для его прогноза необходимы паспортные данные ПП и замеры толщины стенки трубы на регламентируемом множестве контрольных точек, начиная с первого обследования (проводимого после поставки трубы, перед ее монтажом). Выбор множества контрольных точек регламентируется нормативными документами [113,116].

При исследовании процесса малоциклового усталости ПП, в качестве исходной информации используются паспортные данные ПП. Информация обо всех обнаруженных дефектах, на всех этапах жизненного цикла, поскольку согласно принятой концепции ТОР, при анализе учитывается уровень напряженно-деформированного состояния и в дефектной, и в бездефектной зонах рассматриваемого ПП [68,72].

Необходимо учитывать индивидуальные особенности каждого ПП при управлении эффективностью его эксплуатации. Под эффективностью здесь понимается точность прогноза, поскольку наличие ошибки прогноза как в большую, так и меньшую сторону приводит к увеличению затрат, связанных с безаварийной эксплуатацией.

Под алгоритмическим анализом предметной области в данной диссертации понимается анализ математических моделей и соответствующего программного обеспечения, позволяющего приводить необходимые расчеты, анализ качества этих моделей применительно к ПП, а также совершенствование этих моделей и алгоритмов по мере накопления информации о каждом ПП [95].

Под определением требований к операционной обстановке понимается, в том числе, и определение состава специалистов, которые будут предъявлять специфические требования к обработке информации, связанной с тем или иным видом работ. Например, «аналитики по качеству информации», которые будут принимать решения о качестве информации, хранящейся в базе данных, и разрабатывать рекомендации по совершенствованию моделей и алгоритмов предварительной обработки информации: фильтрации некачественной информации и необходимости модернизации аналитической базы ИАСПП и способах модернизации.

Очевидно, что каждая из категорий пользователей, контролирующих операционную обстановку, предъявляет специфические требования к функциональности ИАСПП и структуре необходимой информации.

Поскольку на основании информации, хранящейся в БД, будут приниматься ответственные технические решения, которые могут приводить к огромным материальным затратам, необходимо ограничить права доступа к информации в ИАСПП, в соответствии с кругом задач, решаемых тем или иным пользователем.

На этапе "Логическое проектирование БД" формируются так называемые «ЕР-диаграммы". Под этим понимается разработка прообраза таблиц, в которых будет храниться та или иная информация, необходимая для решения общих и

частных задач, решаемых с использованием разрабатываемой БД. Например, Таблица 2.1 - Атрибуты сущности "Подводный переход". В данной таблице хранится необходимая информация о каждом ПП, зарегистрированном в БД, это может быть информация о проекте создания нового ПП, или перехода уже существующего, но еще не зарегистрированного в БД. Пример содержания подобной таблицы представлен ниже. В колонке "Атрибут» приводится вся информация, необходимая для идентификации (поиска) конкретного ПП, кроме того в другом столбце "Атрибут" приводится информация, уточняющая суть соответствующего атрибута, но используемая только при необходимости "Описание".

Таблица 2.1 - Атрибуты сущности "Подводный переход"

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер ПП	Уникальный номер подводного перехода в пределах ПАО «Транснефть»
Название трубопровода	Название трубопровода согласно принятой нормативной документации
Название подводного препятствия	Географическое название реки, через которую проходит подводный переход
Километр трубопровода	Километр нефтепровода, на котором начинается подводный переход согласно документации на нефтепровод, согласно нормативной документации
Группа сложности ПП	Группы сложности подводных переходов в соответствии с актуальной нормативной базой.

Последующие пункты проектирования БД: составление реляционных отношений, нормализация, определение дополнительных ограничений целостности, выбор системы управления базой данных (СУБД) и других программных средств, создание полной атрибутивной модели. Анализ запросов и

моделей обработки запросов в данной диссертации не рассматривается, т.к. приведенные в диссертации результаты позволят решить эти задачи специалисту по БД, в соответствии с используемой в компании системой управления базами данных.

#### **2.4.2 Информационный анализ исходных данных**

В главе 1 был проведен анализ факторов, определяющих долговечность и эффективность эксплуатации ПП, сформулированы задачи, решение которых позволит обеспечить достаточный уровень долговечности при минимальных затратах. Предложено для решения поставленных задач использовать концепцию "индивидуального остаточного ресурса" на базе современных цифровых технологий [95, 97].

Для решения поставленной задачи, прежде всего, необходима "оцифровка" информации о состоянии каждого ПП системы магистрального трубопроводного транспорта на всех этапах его жизненного цикла. Оцифрованная информация позволяет контролировать эволюцию технического состояние каждого ПП, систематизировать, обобщать и использовать детальный опыт эксплуатации каждого ПП и совершенствовать модели, используемые при принятии технических и экономических решений, связанных с ПП, что, в свою очередь, позволит усовершенствовать постановку задач, сократить период исследований и решения этих задач, а также сроки внедрения эффективных решений в производство.

Под оцифровкой понимается приведение всей доступной информации о текущем состоянии каждого ПП, которое позволит обеспечить её хранение и оперативную обработку в виде, доступном для обработки с помощью компьютеров и последующего представления в виде, удобном для принятия технических решений.

Выше было сказано, что для оцифровки информации требуется решение следующих задач:

- структурирование необходимой и доступной информации;
- формализация параметров, однозначно идентифицирующих объект, вид информации, формальное описание объекта и его расположение в системе координат рассматриваемого комплекса.

Для решения этих задач необходимо использовать результаты анализа технического состояния ПП, описанные в первой главе:

- систему координат ПП, принятых в ПАО «Транснефть»;
- дату обследования технического состояния ПП;
- классификацию дефектов, характерных для магистральных трубопроводов и, в том числе, учитывающих специфику ПП, как составной части системы магистрального транспорта;
- основные принципы формализации каждого класса дефектов, т.е. количество и смысл параметров, характеризующих каждый возможный дефект, обнаруженный в ПП.

На рисунке 2.1 показано, что только после обследования технического состояния ПП выполняются расчеты, связанные с прогнозированием остаточного ресурса обследованного объекта, именно на этом этапе оценивается срок безаварийной эксплуатации ПП, регламентируемый каждым из обнаруженных дефектов ( $T_i$ ) [101].

Расчетные сроки по всем обнаруженным дефектам ранжируются и минимальные берутся за основу при планировании последующих решений. На этом этапе обработки информации не рассматривается и не учитывается никакая информация, кроме величин остаточного ресурса ( $T_i$ ) по всем обнаруженным дефектам. Далее, уже на этапе планирования ремонтно-восстановительных работ, принимается во внимание вид дефекта, поскольку именно он определяет технологию ремонта.

Поэтому, при разработке математических моделей, значимым, с точки зрения хранения и обработки информации, является количество входных параметров, идентифицирующих рассматриваемый дефект. Однако в расчетах для некоторых



дефектов количество входных параметров может совпадать, хотя расчетные модели для них не одинаковы. Но при организации хранения информации о дефектах — это не существенно, т.к. в расчетах каждого дефекта можно использовать дополнительный параметр, указывающий на наименование требуемой для расчетов модели.

Таким образом, в контексте решаемой проблемы, рационально при классификации расчетных моделей напряженно-деформированного состояния в окрестности дефекта, за основу взять количество входных параметров его математической модели: точечные, линейные, поверхностные и объемные. Например, математическая модель дефекта "поверхностная трещина" определяется:

- 1) координатами геометрического центра - (координата по длине трубы, координата по образующей (2 параметра));
- 2) ориентацией трещины относительно оси трубы, т.е. угол наклона к оси трубы (1 параметр);
- 3) размерами трещины: длина, глубина (2 параметра);
- 4) видом поверхности, на которой расположена трещина: внешняя или внутренняя (1 параметр).

Для выбора расчетной математической модели поверхностной трещины потребуется только две величины: длина, глубина. Все остальные характеристики поверхностной трещины (координаты, ориентация, вид), являются уточняющими и требуются либо для адаптации модели, либо при планировании и проведении ремонтно-восстановительных работ.

Кроме того, для анализа динамики развития трещин необходимо контролировать дату проведения обследования, а также внутреннее давление в трубе и контекст: наличие внешних воздействий на трубопровод (есть ли такое воздействие и, если есть, то идентификация этого воздействия и числовые величины, однозначно его описывающие). Это приводит к еще большей размерности параметров, идентифицирующих сам дефект и необходимых для

расчета параметров надежности и эффективности трубы с дефектом "поверхностная трещина", т.к. эксплуатация с таким дефектом, в некоторых случаях, допускается действующими нормативными документами. Собственно, поэтому, в системе трубопроводного транспорта проблема контроля решается посредством "плановых обследований". Контроль осуществляется в установленные периоды времени и на определенных участках в соответствии с принятыми регламентами. Идентификация "закритических и критических дефектов" в теле трубы, решается посредством "внутритрубной диагностики" с последующим анализом влияния дефектов на остаточный ресурс объекта.

### **2.4.3 Определение требований к техническому уровню специалистов**

Предполагается, что с разрабатываемой базой данных будут взаимодействовать следующие категории специалистов:

- специалисты служб, планирующих мероприятия, связанные с обследованиями технического состояния подводных переходов (С\_П\_ОТС\_ПП);
- специалисты служб, осуществляющих обследования технического состояния подводных переходов (С\_ОТС\_ПП);
- аналитики службы управления надежностью ПП (Ан\_УпН\_ПП);
- аналитики службы управления эффективностью эксплуатации ПП (Ан\_УпЭ\_ПП);
- администраторы корпоративной сети.

Анализ требований к системе потенциальных пользователей:

С\_П\_ОТС\_ПП:

- запрос перечня подводных переходов, для которых планируются обследования технического состояния (с текущей даты до аналогичной даты следующего года);
- наименование актуального документа, регламентирующего обследование ПП;

- сроки проведения (начало работ, подтверждение регистрации оформленного отчета с базы данных);

#### С\_ОТС\_ПП:

- запрос актуального документа, регламентирующего обследование ПП перечня подводных переходов;

- планирование актуальных обследований технического состояния в текущем году (включая техническое задание);

- разработка отчета по проведенному обследованию;

- согласование отчета (запрос о качестве отчета);

- доработка отчета (в случае необходимости);

- исправление ошибок.

#### Ан\_УпН\_ПП:

- заключение о качестве исходной информации;

- формирование требований к повторному обследованию;

- постановка задачи по исследованиям аномальных измерений;

- обоснование необходимых изменений в расчетные модели;

- проверка обновленных моделей на ретроспективных данных;

- внедрение изменений в расчетные модели;

- формирование технических условий ТОР ПП на перспективные горизонты;

- актуализация списка и сроков проведения мероприятий по ТОР на перспективные горизонты;

- подготовка отчета по "аномальным данным" за текущий период;

- разработка перспективных планов научных исследований;

- разработка регламента аналитической службы управления надежностью ПП;

#### Ан\_УпЭ\_ПП

- анализ возможности группировки мероприятий по ОТС ПП;

- анализ возможности группировки мероприятий по ремонтам ПП;

- разработка оптимального плана ТОР на планируемые временные интервалы;
- согласование оптимального плана ТОР на планируемые временные интервалы;
- актуализация оптимального плана в БД.

#### **2.4.4 Цель создания системы поддержки принятия решений при эксплуатации подводных переходов**

Для хранения и последующей обработки информации о техническом состоянии ПП необходима разработка регламентов, позволяющих систематизировать информацию обо всех этапах жизненного цикла ПП. Эта информация необходима для принятия обоснованных решений, направленных на повышение эффективности эксплуатации ПП. Проблема касается, прежде всего, формализации и структурирования собранной информации, ее хранения и последующей обработки.

Анализ отчетной документации по проблемам, связанным с ПП, показывает, что действующие регламенты подробно описывают технологию проведения всех видов работ, связанных с ПП. Как правило, значительная часть документации предполагает хранение в виде "твердой копии". Часть этих документов хранится в виде сканированных архивных копий, т.е. не предполагает их широкое использование при принятии тех или иных технических решений. Это делает затруднительным использование результатов исследований для анализа причин и последствий принимаемых решений, т.е. не предполагает цифровой анализ и обработку полученной информации. Формально, создаваемая информационная система может быть отнесена к классу систем поддержки принятия решений.

По результатам исследований, описанных выше, видно, что система трубопроводного транспорта нефти является "информационно сложной" средой, поскольку для формирования выводов о надежности ПП и эффективности их

эксплуатации необходим большой объем информации обо всех стадиях жизненного цикла каждого ПП.

В процессе оценки надежности и эффективности конкретного подводного перехода учитываются статистически обоснованные параметры, вычисляемые по всей совокупности ПП. Таким образом: разрабатываемая система должна представлять информацию и программное обеспечение для формирования многокритериальных решений в сложной информационной среде, т.е. одной из задач решаемых в диссертации, является создание "Системы поддержки принятия решений при управлении надежностью и эффективностью подводных переходов».

В диссертации предполагается использование цифровых технологий при принятии всех технических и управленческих решений, связанных с ПП. При решении этой задачи в первую очередь должна быть решена проблема цифрового представления результатов обследований: типов дефектов, их расположения и размеров, описания характера и интенсивности возможных внешних воздействий, которые необходимы для прогнозирования технического состояния рассматриваемого участка.

Для использования в расчетах прочности и последующей оценки остаточного ресурса необходимо фиксировать текущее состояние дефекта и прогнозируемое. Для расчета возможного размера дефекта на момент истечения срока прогнозирования используются расчетные модели, в которых реальный дефект заменяется неким математическим аналогом, например, поверхностной трещиной и т.п. При этом каждая расчетная модель дефекта характеризуется определенным набором размеров, например, поверхностная трещина определяется координатами местоположения и геометрическими размерами: длиной и глубиной. Кроме того, для анализа динамики развития трещин необходимо контролировать дату проведения обследования, а также внутреннее давление в трубе и контекст: наличие внешних воздействий на трубопровод (есть ли такое воздействие и, если есть, то идентификация этого воздействия и числовые величины, однозначно его описывающие). Это приводит к увеличению размерности параметров,

идентифицирующих сам дефект и необходимых для расчета параметров надежности и эффективности трубы с дефектом "поверхностная трещина", т.к. эксплуатация с таким дефектом, в некоторых случаях, допускается действующими нормативными документами [35,67,72,113,116].

Полученная в результате обследований цифровая информация делает практически возможным использование современных методов компьютерного анализа для управления надежностью и эффективностью системы трубопроводного транспорта в целом и ее отдельных элементов. Имеется в виду, прежде всего то, что результаты подобного контроля обрабатываются с использованием тех или иных моделей, а возможность совершенствования моделей с учетом изменения контролируемых параметров (как в совокупности, так и с учетом динамики старения индивидуально каждого элемента системы) появляется.

Для того, чтобы систематизировать всю информацию о состоянии системы и в перспективе ее использовать на этапе совершенствования моделей, применяемых в расчетах, связанных с надежностью и эффективностью трубопроводных систем, необходимо разработать модели жизненного цикла этих систем. Это позволит, кроме всего прочего, хранить и использовать результаты многочисленных наблюдений за техническим состоянием системы трубопроводного транспорта и эффективно проводить научные исследования, направленные на улучшение методов анализа и прогнозирования состояния таких систем с точки зрения надежности и эффективности.

#### **2.4.5 Проектирование базы исходных данных по подводным переходам как основы создания математических моделей их технического состояния**

ER-модель или модель» сущность-связь» (англ. entity-relationship model, ERM) - модель данных, позволяющая описывать концептуальные схемы предметной области. С её помощью можно выделить ключевые сущности и обозначить связи, которые могут устанавливаться между этими сущностями.

Первым этапом разработки баз данных является определение сущностей и атрибутов [92,101].

Сущность - это объект (таблица), выделяемый пользователем в предметной области. Атрибут - это поименованная характеристика сущности (свойство типа сущности), значимая с точки зрения пользователя.

Проведенный анализ показал, что в контексте решаемой проблемы значимой является информация, представленная в таблицах 2.2...2.18, приведенных ниже.

Таблица 2.2 – Атрибуты сущности «Подводный переход»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер ПП	Уникальный номер ПП подводного перехода трубопровода в системе магистральных нефтепроводов
Название трубопровода	Название трубопровода согласно документации
Название подводного препятствия	Название реки, через которую проходит подводный переход нефтепровода
Километр трубопровода	Километр нефтепровода, на котором начинается подводный переход согласно документации на нефтепровод
Группа сложности ПП	Группы сложности подводных переходов в зависимости от ширины водного объекта

Таблица 2.3 – Атрибуты сущности «Характеристика водного препятствия»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер ПП	Номер ПП
Ширина и глубина водного объекта	Ширина и глубина водного объекта
Паводковый режим	Весенний паводок средней продолжительности (2 – 4 недели).

	Весенне-летний паводок длительной продолжительности. Неоднократно-повторяющиеся.
Виды грунтов, слагающих дно реки и берега	Песчаные. Супесчаные. Гравийные. Гравийно-галечниковые. Суглинистые. Тяжелые суглинистые небольшого объема (не более 10%). Скальные участки отсутствуют. Переходы, где трубопроводы уложены в тяжелых глинистых грунтах (не более 50%). Переходы через водоемы, где трубопроводы уложены в грунт, имеющий скальные включения или валунные отложения на дне и берегах.
Категория участка из учета русловой деформации	Категории участка реки из учета русловой деформации.
Наличие судоходности	Судоходные и сплавные реки и водоемы. Несудоходные реки.
Особенности ледового режима	Ледовый режим не позволяет работать со льда. Ледовый режим позволяет работать со льда. Возможны зажоры, заторы на участке пересечения преграды.
Доступность участка для проведения технического	Переходы, не имеющие заболоченных участков на пойме; возможность объезда стариц, озер и прохода технических средств по пойме при проведении ТОР, за исключением паводкового периода.



обслуживания и ремонта (ТОР) на пойме	Переходы, имеющие болотистые участки значительной протяженности на пойме, объезд (обход) или проход стариц, озер не возможен без специальной инженерной подготовки.
---------------------------------------	---

Таблица 2.4 – Атрибуты сущности «Конструкционное исполнение»

Атрибут	Описание
Номер ПП	Номер ПП
Наличие резерва	Однониточный. Двухниточный. Многониточный с указанием количества ниток.
Диаметр	Диаметр ниток перехода совпадает с диаметром трубопровода за границей перехода. Диаметр основной нитки совпадает, резервная нитка (нитки) имеет меньший диаметр. Диаметр ниток перехода меньше диаметра трубопровода за границами перехода.
Степень защиты окружающей среды и ремонтпригодность ПП	ПП, имеет оборудование для защиты водной акватории от загрязнения нефтью сточными водами и их локализации в случае попадания в водоем. ПП, не имеет оборудования для защиты водоемов от загрязнений нефтью. Трубопроводы, уложенные в кожухе (типа “труба в трубе”). Трубопроводы, проложенные способом наклонно направленного бурения.
Проектное исполнение укладки	Труба в трубе уложена с заглублением ниже отметок дна. Труба уложена в траншее по дну.

Обеспечение устойчивости положения трубы на заданных отметках изгиба по заданной кривой	Обеспечивается весом трубы и продукта. Обеспечивается пригрузами.
Исполнение и состояние запорной арматуры	ПП, оборудованный задвижками с ручным управлением. ПП, оборудованный задвижками с электроприводом (гидроприводом). ПП с дистанционным и местным управлением.
Наличие камер пуска и приема скребка	Камера приема и пуска отсутствует. Камера приема и пуска имеется на основной нитке.

Таблица 2.5 – Атрибуты сущности «Особенности эксплуатации»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Наличие пунктов технического обслуживания	Наличие пунктов технического обслуживания
Эффективность работы станций электрохимической защиты (при их наличии)	Эффективность работы станций электрохимической защиты (при их наличии)
Стабильность перекачки	Стабильность перекачки
Характер выполнения технического обслуживания и ремонта	Характер выполнения технического обслуживания и ремонта
Работа перехода с включенными одной или несколькими нитками	Работа перехода с включенными одной или несколькими нитками

Таблица 2.6 – Атрибуты сущности «Конструкция защитного покрытия трубопровода»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Вид покрытия	Вид покрытия
Условия нанесения покрытия	Условия нанесения покрытия
Конструкция защитного покрытия	Конструкция защитного покрытия
Толщина покрытия	Толщина покрытия

Таблица 2.7 – Атрибуты сущности «Конструкция берегоукреплений»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Конструкция	Конструкция берегоукреплений
Контролируемые параметры	Контролируемые параметры берегоукреплений
Допустимое значение отклонения	Допустимое значение отклонения контролируемого параметра
Метод контроля	Метод контроля берегоукреплений

Таблица 2.8 – Атрибуты сущности «Уровень качества проектирования и дефекты строительного периода»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Уровень качества проектирования	Уровень качества проектирования
Дефекты строительного периода	Дефекты строительного периода

Таблица 2.9 – Атрибуты сущности «Планово-высотное положение»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода

Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования
Координаты трассы ПП	Координаты трассы ПП
Толщина слоя грунта над трубопроводом	Толщина слоя грунта над трубопроводом
Длина провиса	Длина провиса
Предельно допустимое давление для размывших участков	Предельно допустимое давление для размывших участков
Предельно допустимое давление для провисших участков	Предельно допустимое давление для провисших участков

Таблица 2.10 – Атрибуты сущности «Коррозионное состояние ПП и состояние изоляционного покрытия»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования
Наличие сквозных дефектов изоляции	Наличие сквозных дефектов изоляции
Значение защитной разности потенциалов труба-земля	Значение защитной разности потенциалов труба-земля

Таблица 2.11 – Атрибуты сущности «Отклонение геометрии трубы»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования
Размеры гофр	Размеры гофр
Размеры вмятин	Размеры вмятин
Размеры выпуклостей	Размеры выпуклостей
Разность диаметра труб	Разность диаметра труб
Радиусы поворота	Радиусы поворота

Таблица 2.12 – Атрибуты сущности «Изменения толщины стенки трубы»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования
Трещины	Трещины
Царапины	Царапины
Зазубрины	Зазубрины
Задиры	Задиры
Расслоения	Расслоения

Таблица 2.13 – Атрибуты сущности «Герметичность и целостность трубопровода»  
(контроль за давлением в межтрубном пространстве при прокладке ПП методом «труба в трубе»)

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования
Давление	Давление
Аварийный порыв трубы	Аварийный порыв трубы
Наличие утечек из ПП	Наличие утечек из ПП

Таблица 2.14 - Атрибуты сущности «Плановые и глубинные деформации реки в районе ПП»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования
Возможный профиль размыва	Возможный профиль размыва

Таблица 2.15 – Атрибуты сущности «Состояние сооружений защиты берегов от размывов и волновых воздействий»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Способ контроля	Способ контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата обследования	Дата обследования

Рельеф берегоукрепительных сооружений	Рельеф берегоукрепительных сооружений
Состояние берегоукрепительных сооружений	Состояние берегоукрепительных сооружений

Таблица 2.16 – Атрибуты сущности «Запорно регулирующая арматура с примыкающими береговыми участками трассы ПП» (на ПП, имеющем береговые задвижки любого исполнения)

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Тип контроля	Тип контроля
Периодичность контроля	Периодичность контроля
Размеры границ съемки	Размеры границ съемки
Дата проведения обследования	Дата проведения обследования
Высотное положение арматуры	Высотное положение арматуры
Глубина залегания примыкающего к арматуре трубопровода	Глубина залегания примыкающего к арматуре трубопровода
Высотное положение опорного фундамента	Высотное положение опорного фундамента

Таблица 2.17 – Атрибуты сущности «Коррозионные повреждения внутренней поверхности стенки трубы»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Дата обследования	Дата обследования
Координат длины трубы ПП	Координата трубы, исчисляемая в миллиметрах от начала ПП.

Радиальная координата внутренней поверхности стенки трубы	Координата поперечного сечения трубы, измеряемая в радианах.
Значение	Значение толщины стенки трубы.
Ошибка измерения	Этот параметр принимает значение “error”, если значение толщины стенки трубы в результате тестирования качества ИИ было определено как “ошибка измерения”.

Таблица 2.18 - Атрибуты сущности «Коррозионные повреждения наружной поверхности стенки трубы»

<b>Атрибут</b>	<b>Описание</b>
Номер подводного перехода	Номер подводного перехода
Дата обследования	Дата обследования
Координаты трубы ПП	Координата трубы, исчисляемая в миллиметрах от начала ПП.
Координата поперечного сечения трубы	Координата поперечного сечения трубы, измеряемая в соответствии с регламентом.
Значение	Значение толщины стенки трубы.
Ошибка измерения	Этот параметр принимает значение “error”, если значение толщины стенки трубы в результате тестирования качества ИИ было определено как “ошибка измерения”.

Результаты анализа взаимосвязей между сущностями приведены на рисунках 2.3 - 2.4.



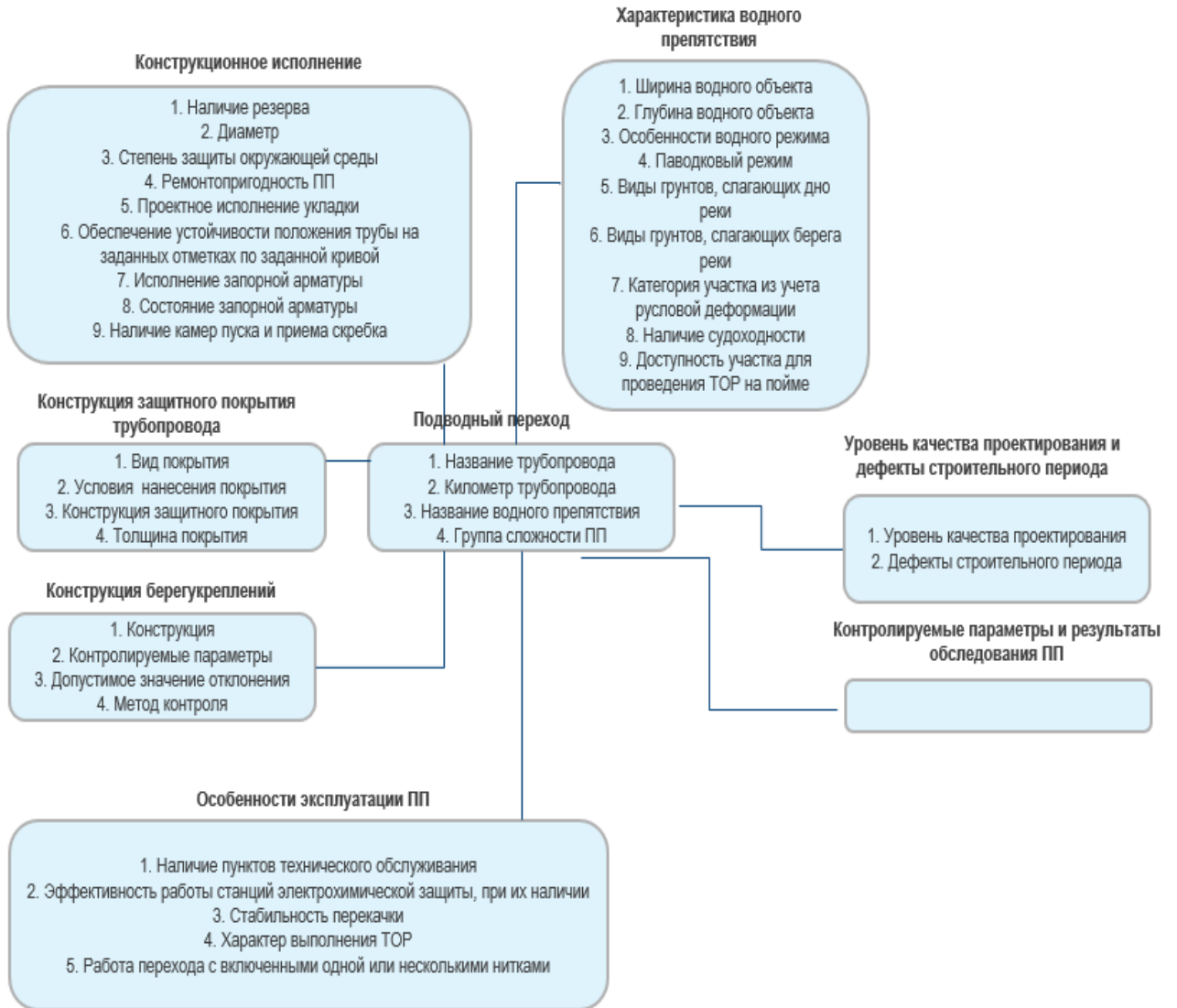


Рисунок 2.3 – Фрагмент-1 ER-диаграммы БД подводных переходов

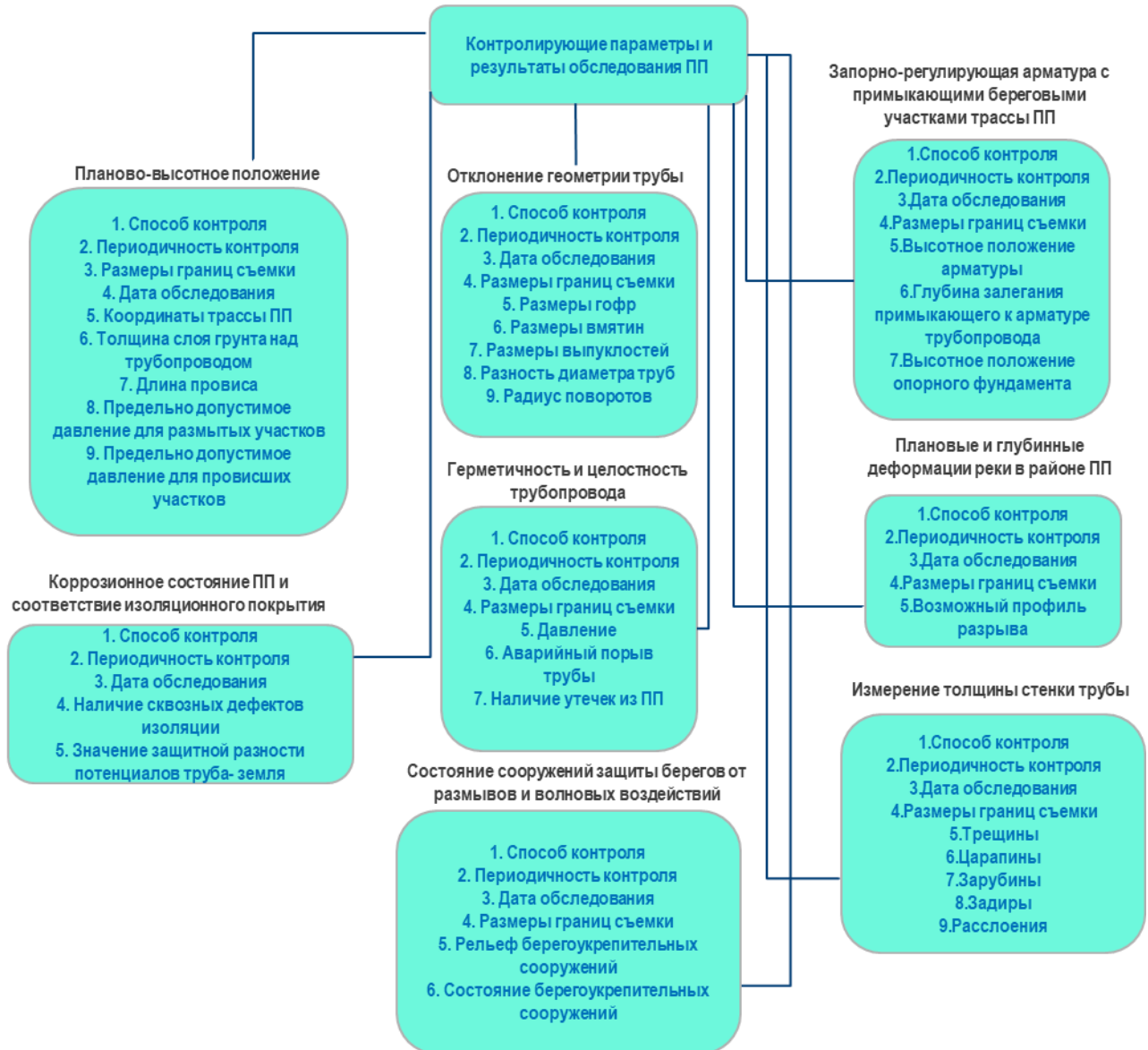


Рисунок 2.4 – Фрагмент-2 ER-диаграммы БД подводных переходов

На этапе физического проектирования базы данных решается вопрос о выборе СУБД. В ПАО «Транснефть» базы данных используются уже давно, поэтому рационально для внедрения предлагаемых решений использовать традиционно используемую СУБД, т.к. штат сотрудников ИВЦ уже укомплектован высококвалифицированными специалистами, они занимаются внедрением новых разработок и без труда реализуют предлагаемые решения средствами используемой СУБД.

На этапе проектирования прикладного программного обеспечения формируются "модели вариантов использования», но при их разработке используются знания и опыт инженерного персонала компании, поэтому указанную задачу придется решать на стадии внедрения, и она не включена в перечень задач, решаемых в данной диссертации.

Задачи, связанные с проектированием средств поддержки принятия решений, будут решаться при тестировании подсистемы математической обработки информации, хранимой в БД, и решения, предложенные в диссертации, могут быть использованы для разработки прикладных программ и форматов представления результатов расчетов.

Представленные материалы исследований описываются моделью, приведенной на рис. 2.5.

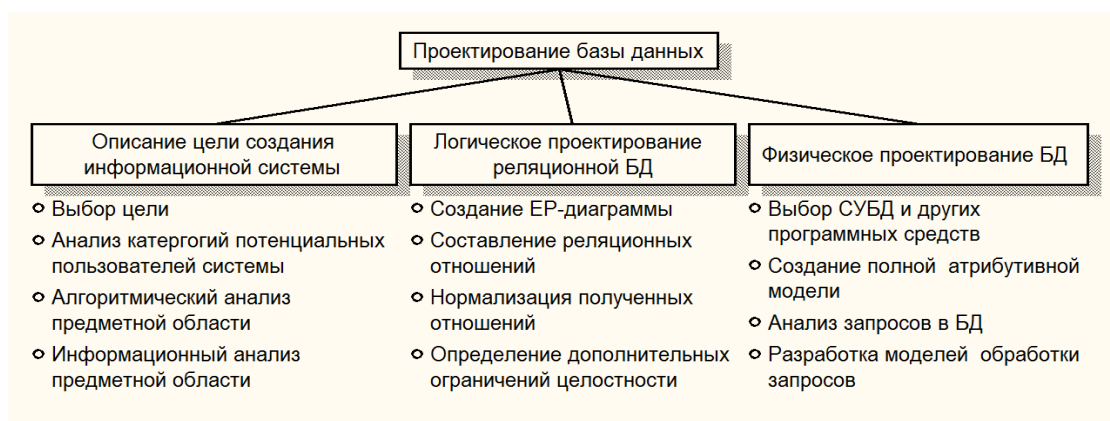


Рисунок 2.5 – Диаграмма дерева узлов процесса проектирования базы данных «Техническое состояние подводных переходов»

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработан алгоритм информационной поддержки принятия решений по установлению характеристик технического состояния подводных переходов и математических моделей по его описанию, повышающий достоверность результатов на основе учета самых значимых составляющих - уровня качества проектирования дефектов строительного периода и особенностей эксплуатации каждого конкретного перехода.

2. Определены требования к исходной информации по подводным переходам: достоверность исходных данных; полнота (достаточность) исходных данных; репрезентативность информации; актуальность исходных данных; своевременность информации; точность исходной информации; устойчивость информации.

3. Разработан алгоритм процесса проектирования базы данных о подводных переходах магистральных нефтепроводов с помощью которого производится информационный и алгоритмический анализ предметной области подводных трубопроводов.

4. Разработан алгоритм создания базы данных для оценки технического состояния подводных переходов и его моделирования.

### ГЛАВА 3 ПОИСК И АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ВАРИАЦИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЕГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

В настоящее время в трубопроводном транспорте (ТТ) используется парадигма управления техническим состоянием элементов системы ТТ на основании прогноза процессов коррозионного и малоциклового износа [8, 40,43,47,59,60,66]. Функциональная модель этой парадигмы в приложении к жизненному циклу подводного перехода может быть представлена следующим образом на рисунке 3.1.

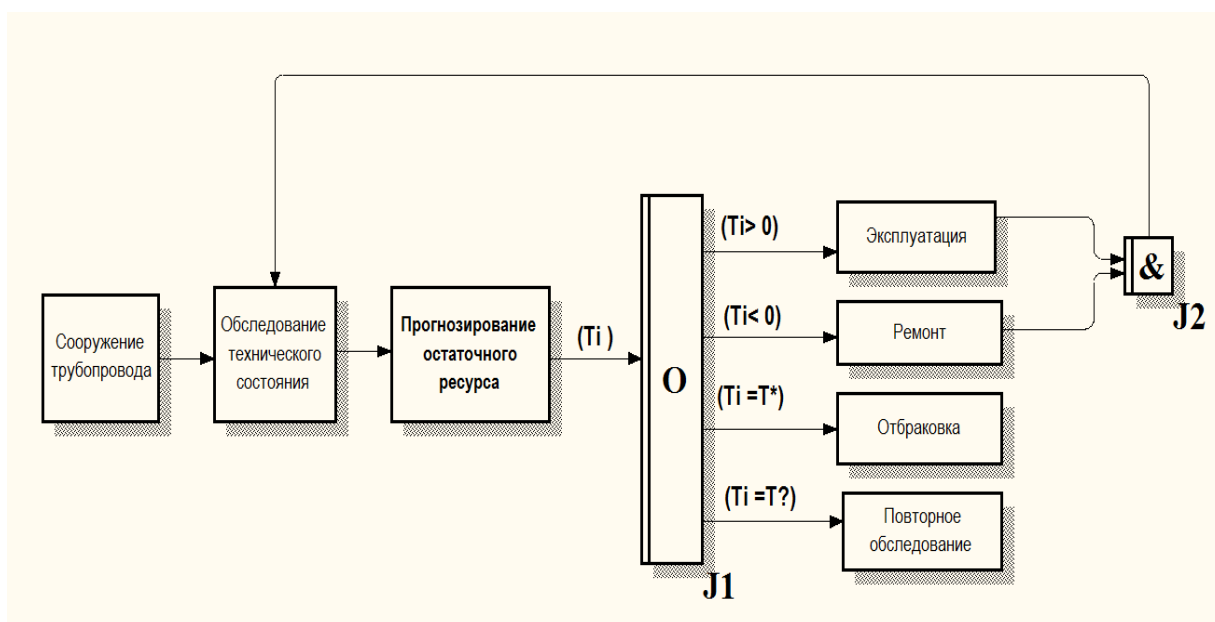


Рисунок 3.1 – Модель жизненного цикла ПП

После сооружения ПП выполняется "обследование его технического состояния (ОТС)", целью которого является контроль соответствия качества выполненных работ основным техническим регламентам и стандартам.

Если процесс "сооружение трубопровода" выполнен в соответствии с проектом, результаты обследований передаются для оценки остаточного ресурса контролируемого участка трубопровода. Результатом прогнозирования является

период времени от запуска в эксплуатацию до момента, когда эксплуатация станет небезопасной ( $T_i$ ). Поскольку обследований может быть много (на всем протяжении жизненного цикла контролируемого участка), каждому обследованию присваиваются порядковые номера  $\{0, 1, 2, \dots i, \dots n-1, n\}$ . По результатам прогнозирования остаточного ресурса (времени безаварийной эксплуатации обследованного участка) формируется заключение, в котором указывается допустимый срок эксплуатации обследованного участка ( $T_i$ ).

На модели введены следующие обозначения:

$T_i > 0$  - допускается дальнейшая эксплуатация участка;

$T_i < 0$  - дальнейшая эксплуатация участка не допускается, необходим ремонт;

$T_i = T^*$  - ремонт признается нецелесообразным, предлагается отбраковка участка;

$T_i = T?$  - требуется повторное обследование на предмет уточнения данных, полученных при предшествующем обследовании.

Приведенная парадигма позволяет более эффективно управлять материальными и трудовыми ресурсами системы магистрального ТТ, по сравнению с предшествующими парадигмами системами эксплуатации ТТ.

Современный уровень научно-технического прогресса позволяет создавать информационно-аналитические системы хранения всей информации о элементах системы ТТ как по составу, так и по хронологии мероприятий, связанных с техническим обслуживанием, ремонтно-восстановительными работами и используемыми для этого материальными и трудовыми ресурсами. Подобная информационно-аналитическая система опирается на информацию, сформированную по результатам контроля и сбора необходимой исходной информации о техническом состоянии объектов, систему математической обработки полученных результатов, систему хранения информации и управления информацией. При этом объем всех видов информации и средств ее обработки огромен, что согласно [14,81,87,109,125] требует учета и контроля качества информации на всех этапах ее обработки. Известно, что на каждом этапе обработки изменяется ее качество, одним из которых является погрешность. Анализ

погрешности информации в данной работе уделяется особое внимание, связанное с математической обработкой.

Предлагается при выборе используемых математических моделей (если это возможно), руководствоваться критерием "робастности математических моделей». Робастность характеризует устойчивость математической модели по отношению к погрешностям исходных данных, способность предугадывать эти погрешности и не допускать их чрезмерного влияния на результат вычислительного эксперимента.

Причинами низкой робастности математической модели могут быть: необходимость при ее количественном анализе вычитания близких друг к другу приближенных значений величин или деления на малую по модулю величину, а также использование в математической модели функций, быстро изменяющихся в промежутке, где значение аргумента известно с невысокой точностью. Иногда стремление увеличить полноту математической модели не приводит к желаемому результату, так в данной главе показано, что при прогнозировании коррозионного износа внутренней поверхности магистрального трубопровода, лучшей по критерию робастности является простейшая модель.

В первой главе диссертации приведен анализ научно-технической литературы, посвященный оценкам безопасности подводных переходов, как одного из элементов системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов.

Анализ показал, что основной причиной снижения живучести ПП являются: процессы, связанные с воздействиями внешней среды (износ и старение элементов конструкции под воздействием факторов, предусмотренных проектом); отклонения от нормативов и правил производства работ:

- отступления от проектных решений;
- заводские дефекты труб и оборудования;
- дефекты изготовления и монтажа;
- нарушения правил эксплуатационного и ремонтного периодов.

Согласно [7,8,11,13,66] все отклонения от проекта называются дефектами. Дефекты являются инициаторами повышенных напряжений, по сравнению с напряжениями, определенными в проекте, что приводит к ускорению процессов износа и старения в этих зонах.

На рисунке 3.2 предложена следующая модель прогноза технического риска магистрального трубопровода (в том числе и подводного перехода).

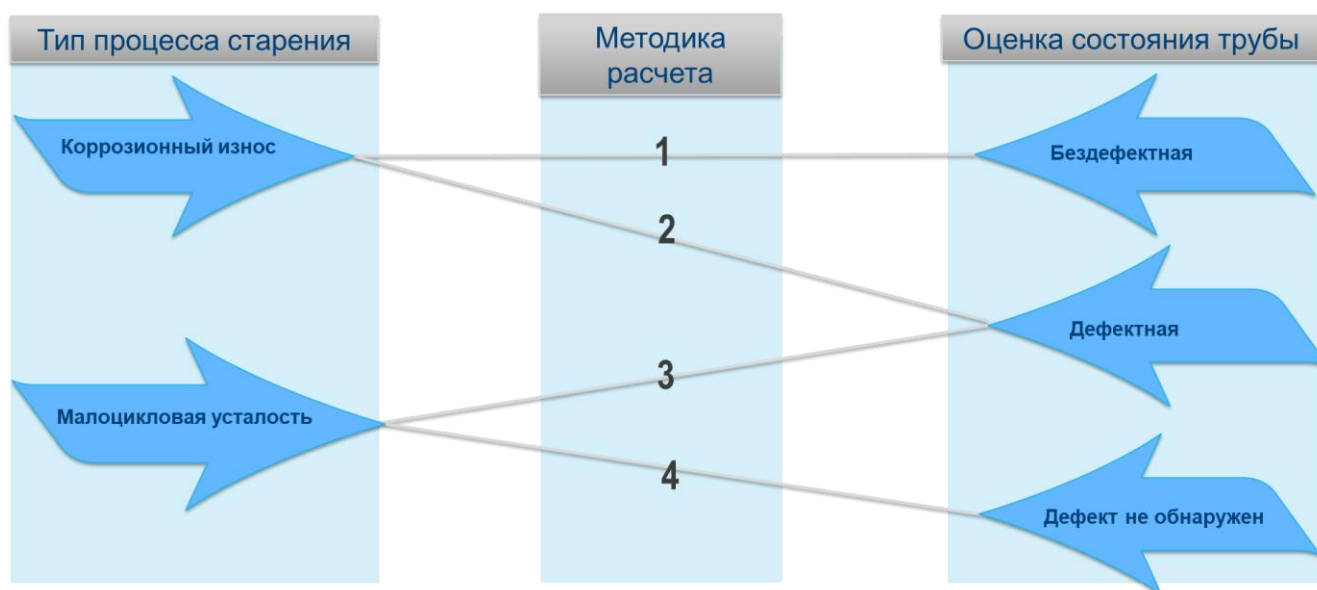


Рисунок 3.2 – Структурная схема прогноза технического состояния подводного перехода магистрального трубопровода

В схеме цифрами обозначены:

- прогноз статической прочности в бездефектной зоне;
- прогноз статической прочности в зоне с концентратором напряжений;
- прогноз малоцикловой усталости в дефектной зоне;
- прогноз малоцикловой усталости в предположении о том, что на рассматриваемом участке имеется необнаруженная трещина.

Обоснованность данной модели подтверждена тем, что она была принята к использованию в системе магистрального транспорта и успешно используется по настоящее время. При решении поставленной задачи будем использовать эту модель в качестве базовой. Прогноз статической прочности в бездефектной зоне



осуществляется на стадии проектирования трубопровода. При этом возможные отклонения от проектных значений нагрузок и воздействий компенсируются запасами прочности и несущей способности [11,30,31,53,59,62,66]. В зонах концентрации напряжений, предусмотренных проектом, прогноз статической прочности осуществляется аналогично.

Коррозионный износ в бездефектной зоне оценивается при помощи соответствующих математических моделей на основании результатов замера толщины стенки трубопровода, с последующей оценкой скорости коррозии внутренней и/или внешней поверхности с учетом наличия и состояния средств антикоррозионной защиты. Коррозионный износ в дефектной зоне оценивается в соответствии с результатами научных исследований, опубликованных в следующих работах [34,37,41,42].

Оценка состояния трубы по критериям малоциклового усталости производится в соответствии с результатами научных исследований, опубликованных в следующих работах [38,39,48,52,56,64,65,109].

Следует заметить, что основные работы по малоциклового усталости трубопроводов разработаны с использованием моделей, первоначально предназначенных для анализа малоциклового усталости конструкций, которые не могут быть классифицированы как тонкостенные оболочки. Но после проведения лабораторных исследований часть этих моделей была адаптирована к оболочкам, используемым в трубопроводном транспорте.

На рисунке 3.2 показано, что оценку малоциклового усталости следует выполнять и в том случае, когда "дефект не обнаружен". При этом подразумевается, что часть дефектов может быть не обнаружена, так как технология обследований технического состояния объектов системы трубопроводного транспорта не предполагает полного обследования, т.е. обследованию подлежат выборочные участки поверхности трубопровода, те, в которых предполагается повышенный уровень напряженного состояния. Кроме

того, часть дефектов может быть не обнаружена вследствие погрешности измерительной аппаратуры, используемой при обследовании.

При проведении анализа моделей прогнозирования технического состояния подводных переходов были использованы следующие критерии:

- доступность входных параметров модели (под доступностью понимается возможность получения требуемых параметров модели современными техническими средствами);
- робастность модели, что позволяет, в одних случаях исключить указанный параметр из модели в других - рассматривать указанный входной параметр как константу, т.к. влияние параметра незначимо, в допустимых пределах. В этом случае расчетная модель существенно упрощается, без ущерба по отношению к требуемому качеству модели.

### 3.1. Моделирование коррозионного износа трубопровода

Проблема коррозионного износа объектов трубопроводного транспорта является одной из важнейших в нефтегазовой промышленности. В научно-технической литературе представлено значительное количество моделей коррозионного износа внутренней поверхности трубопровода: от самых простых, пренебрегающих влиянием различных факторов на скорость коррозии, например, [33,34,37,41,42].

$$t = \frac{S_o - S_{кр}}{V_0}, \quad (3.1)$$

где  $t$  - время допустимой эксплуатации участка трубопровода;

$S_o$  - начальная толщина стенки трубопровода;

$S_{кр}$  - предельная толщина стенки участка трубопровода;

$V_0$  - скорость коррозии ненапряженного элемента;

до более сложных, позволяющих оценивать влияние напряженного состояния стенки трубы, температуру перекачиваемого продукта и т.п.

Исследуем одну из таких моделей, предложенную в работе [48]:

$$V = V_0 \cdot \exp\left[\frac{v \cdot \sigma(\tau)}{R \cdot T(\tau)}\right], \quad (3.2)$$

где  $V$  - скорость коррозии напряженного элемента, мм/год;

$V_0$  - скорость коррозии ненапряженного элемента, мм/год;

$\sigma$  - среднее напряжение, МПа;

$\tau$  - время;

$v$  - мольный объем металла, для стали 7 см<sup>3</sup>/моль;

$R$  - Универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/моль;

$T$  - температура среды по Кельвину.

Проведем анализ чувствительности этих моделей. Под "анализом чувствительности" подразумевается анализ влияния результатов изменений (в рамках модели) на погрешность отдельных параметров. При исследовании чувствительности моделей особое внимание уделяется процессу эволюции всех параметров. В современной науке для описания процессов происхождения, возникновения, становления, развития и гибели объектов используется термин – «генезис».

В рамках рассматриваемой проблемы было введено понятие "информационный генезис", которое предполагает подробный анализ процессов жизненного цикла информации в информационных системах в соответствие с жизненным циклом подводного перехода. В частности, анализу подлежат все этапы обработки информации в контексте возможных погрешностей: от получения, ввода в систему, преобразования при использовании математических моделей, до получения итогового результата, на основании которого выносятся то, или иное решение о состоянии описываемого объекта и перспективах последующей работоспособности.

В связи с тем, что информация – специфический объект, необходима адаптация этого понятия к информационным системам, создаваемым для использования в технических приложениях. В данной работе термин "генезис информации о техническом состоянии", трактовки и возможные корректировки будут приводиться ниже по тексту.

Предлагается следующая модель генетического анализа информации в системе прогнозирования технического состояния трубопроводов:

- определение первоисточника информации по каждому входному параметру (ВП);
- анализ достоверности информации по ВП;
- разработка процедуры "отбраковки" или "восполнения" некачественной информации, в случае необходимости;
- анализ погрешности приборов, используемых при определении ВП;
- анализ "маршрута" информации в информационной системе - последовательности ее преобразований в системе;
- анализ погрешностей, связанных с каждым узлом маршрута ВП в системе;
- формирование интегральной оценки погрешности выходной информации;
- разработка дополнений в регламент обследований технического состояния объекта, связанные с генезисом используемой информации, в случае необходимости;
- внесения изменений в процедуры генетического анализа информации в информационной системе, в случае необходимости.

Рассмотрим некоторые детали предлагаемой модели генетического анализа на примере простейшей модели коррозионного износа (3.1).

На первом этапе генетического анализа информации в системе прогнозирования технического состояния трубопроводов предлагается

классифицировать параметры модели (3.1) на предмет первоисточника (т.е. каким способом получена эта информация):

- является константой - погрешность ее измерений принимается равной нулю;
- измерена прибором - погрешность указана в паспорте прибора;
- получена посредством математических моделей - погрешность оценивается математическими методами;
- получена посредством статистической обработки измеренной информации;
- получена посредством экспертной оценки.

В рассматриваемом примере модель содержит параметры  $S_o$ ,  $S_{кр}$  и  $V_o$ . Поскольку результатом исследования будут базисом (основой) информационно-аналитическая система, генетический анализ информации целесообразно представлять в структурированном виде, например, в виде таблицы 3.1, приведенной ниже.

Таблица 3.1. Представление результатов генетического анализа

Наименование поля	Значение
1. Имя параметра	
2. Единица измерения	
3. Величина параметра	
4. Тип (по способу определения погрешности):	
4.1. Константа;	
4.2. Измерение;	
4.3. Математическая модель;	
4.4. Статистический анализ;	
4.5. Экспертная оценка	
Величина погрешности	

В поле №4 " Тип параметра (по способу определения погрешности)" возможны пять взаимоисключающих вариантов:

- в поле 4.1 (Константа) - определяется в результате научных исследований, например, "универсальная газовая постоянная", "модуль упругости" и т.п. В процессе генетического анализа принимается априори, что погрешность ее измерения равна нулю;
- в поле 4.2 (Измерение) - предполагается, что параметр определяется штатным прибором, с указанной в документации погрешностью измерения;
- в поле 4.3 (Математическая модель) - предполагается, что исследуемый параметр получен в результате применения известной математической формулы, позволяющей вычислить погрешность результата с использованием "полного дифференциала";
- в поле 4.4 (Статистический анализ) - предполагается, что исследуемый параметр получен актуальными методами статистического анализа представительной выборки приемлемого объема, с указанием доверительного интервала;
- в поле 4.5 (Экспертная оценка) - предполагается, что погрешность исследуемого параметра определена с использованием стандартных процедур экспертного оценивания.

В рассматриваемом примере приведены результаты генетического анализа срока допустимой эксплуатации участка трубопровода ( $t$ ), вычисленного по формуле (3.1) и представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты генетического анализа времени допустимой эксплуатации участка трубопровода, вычисленного по (3.1)

Наименование поля	Значение
Имя параметра	$S_o$
Единица измерения	мм
Величина параметра	10

Тип параметра	Статистический анализ
Величина погрешности параметра	0.5
Имя параметра	$S_{кр}$
Единица измерения	мм
Величина параметра	7
Тип параметра	Константа
Величина погрешности параметра	0
Имя параметра	$V_0$
Единица измерения	мм/год
Величина параметра	0,7
Тип параметра	Статистический анализ
Величина погрешности параметра	0.2

Для анализа модели (3.1) используем известное соотношение из математического анализа:

$$\Delta t = \left[ \frac{\partial t}{\partial S_0} \right] \cdot \Delta S_0 + \left[ \frac{\partial t}{\partial S_{кр}} \right] \cdot \Delta S_{кр} + \left[ \frac{\partial t}{\partial v_0} \right] \cdot \Delta v_0 + o(\Delta S_0; \Delta S_{кр}; \Delta v_0) \quad , (3.3)$$

где

$o(S_0; S_{кр}; \Delta v_0)$  - составляющая, которая имеет более высокий порядок малости по сравнению с главной (линейной) частью соотношения (3.2);

$\Delta t, \Delta S_0, \Delta S_{кр}, \Delta V_0$  - погрешности соответствующих величин.

После несложных преобразований, получим выражение для вычисления полного дифференциала применительно к модели (3.1):

$$\Delta t \approx \frac{1}{v_0} \Delta S_0 + \frac{1}{v_0} \Delta S_{кр} + \frac{S_0 - S_{кр}}{(v_0)^2} \Delta v_0 \quad . (3.4)$$

После подстановки приведенных в таблице 3.2 значений  $S_o$ ,  $S_{кр}$  и  $V_0$ , в выражение (3.4) получим

$$\Delta t \approx \frac{1}{0,7} \cdot 0,5 + \frac{10-7}{0,49} \cdot 0,2 \approx 1,22 \text{ (года)}.$$

Таким образом, величина остаточного ресурса по критерию коррозионного износа в бездефектной зоне, вычисленная по формуле (3.1) составит

$$t = \frac{10-7}{0,7} = (4,29 \pm 1,22) \text{ года}$$

т.е. относительная погрешность составляет около 30%.

Исследуем более сложную модель (3.2), предложенную в работе [48], в которой предполагается, что на интенсивность коррозии влияет уровень напряжений в стенке трубы и температура перекачиваемого продукта. В данном случае, если влияние уровня напряжений и температуры значимо, отношение скорости коррозии напряженного элемента ( $V$ ) к скорости коррозии ненапряженного элемента ( $V_0$ ) будет отлично от единицы. В случае, если такое влияние отсутствует или пренебрежительно мало (в контексте проблемы надежности магистрального трубопроводного транспорта), указанное отношение будет близким к единице, т.е. аргумент экспоненты будет близок к нулю.

Исследуем эту проблему с использованием тех же исходных данных, что и предыдущем примере (3.1) и соответствующих результатов генетического анализа параметров модели времени допустимой эксплуатации участка трубопровода (см. таблицу 3.2).

Размерности входных параметров модели:

$$m = 10^{-3} \text{ м};$$

$$MPa = N/m^2 = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2};$$

$$Дж = \text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2};$$

$$K = 273 + ^\circ\text{C}$$

Произведем анализ размерностей:



$$\begin{aligned} \left[ \frac{v \cdot \sigma(\tau)}{R \cdot T(\tau)} \right] &= \frac{7 \text{ см}^3 / \text{моль} \cdot \text{МПа}}{8,31 \text{ Дж} / \text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \frac{\langle \sigma \rangle}{\langle T \rangle} = 0,842 \cdot \frac{\text{см}^3 \cdot \text{МПа}}{\text{Дж} \cdot \text{К}} \cdot \frac{\langle \sigma \rangle}{\langle T \rangle} = \\ &= 8,42 \cdot 10^{-5} \frac{\langle \sigma \rangle}{\langle T \rangle} \cdot \frac{\text{М}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{М}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}}{\text{кг} \cdot \text{М}^2 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}} \cdot \frac{\langle \sigma \rangle}{\langle T \rangle} = 8,42 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\langle \sigma \rangle}{\langle T \rangle} . \end{aligned}$$

Здесь:  $\langle \sigma \rangle$  измеряется в МПа,  $\langle T \rangle$  - в градусах Кельвина.

Таким образом, формулу 3.2 можно записать в виде:

$$V = V_0 \cdot \exp \left[ 8,42 \cdot 10^{-5} \frac{\sigma(\tau)}{T(\tau)} \right] . \quad (3.5)$$

Значение  $\sigma(\tau)$  в реальных условиях имеет порядок 200...400 (в МПа), а  $T(\tau)$  - порядок 273...310 (в градусах Кельвина), то выражение в квадратных скобках имеет порядок менее  $10^{-5}$ , поэтому можно записать

$$\frac{V}{V_0} = 1 \pm 10^{-5} .$$

В соответствии с вышеизложенным, можно сделать следующие выводы:

- в расчетах коррозионного износа магистральных трубопроводов по модели (3.2) скорость коррозии можно считать постоянной, т.е. при анализе коррозионного износа подводного перехода рационально использовать математическую модель 3.1.;

- критическим параметром, характеризующим коррозионный износ стенки подводного перехода, можно считать минимальную толщину стенки в контролируемой зоне (в табл.3.2. это величина  $S_0$ ).

### 3.2. Моделирование малоциклового усталости трубопровода

Рассмотрим математическую модель малоциклового усталости, предложенную в работах [40,50,52,54,65,107]:

$$\frac{dl}{dN} = \alpha \cdot (\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l})^n \quad \text{или} \quad dN = \frac{dl}{\alpha (\sigma \sqrt{\pi l})^n} , \quad (3.6)$$

где  $\ell$  - глубина усталостной трещины, мм;

$N$  - число циклов нагружения конструкции;

$\sigma$  - нормальные напряжения в окрестности трещины, МПа;

$\alpha$  и  $n$  - параметры, адаптирующие модель (3.6) к условиям трубопроводного транспорта.

На рисунке 3.3. показана модель поверхностного дефекта - трещины, традиционно используемая в расчетах, связанных с малоцикловой усталостью.

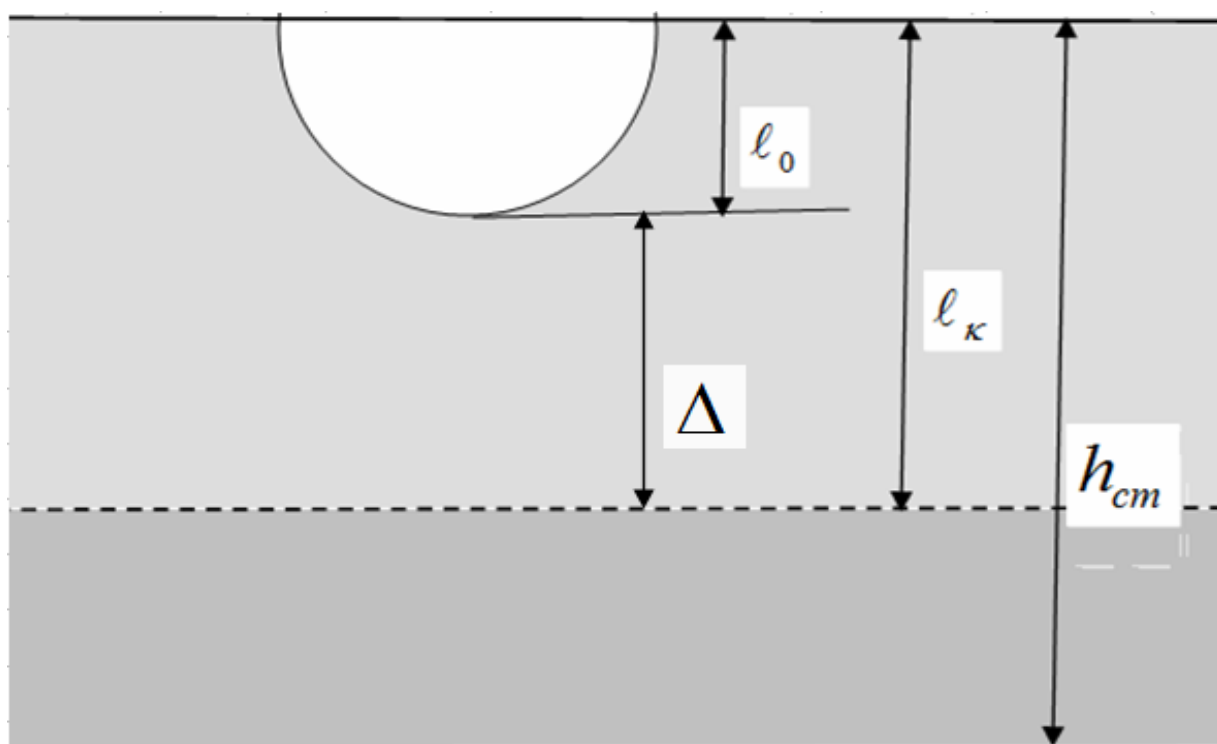


Рисунок 3.3. Расчетная схема поверхностного дефекта

Как правило, при разработке моделей циклической долговечности трубопроводов пользуются некоторыми допущениями:

- производится расчет числа циклов на этапе развития (роста) трещины, поскольку в соответствии с [48,52] у эксплуатируемого длительное время трубопровода, в стенке уже присутствуют трещины (или трещиноподобные дефекты);

- в расчетах принимается форма дефекта в виде полукруга, т.е. его начальная глубина равна  $\ell_0$ , а критическая  $\ell_k$ . При достижении критической глубины вероятно нарушение целостности трубопровода;

- согласно [64,65] усталостная трещина в оболочечных конструкциях развивается эквидистантно, но глубина трещины не может превышать толщину стенки трубы в зоне дефекта, поэтому введём ограничение:  $\ell_k = \lambda \cdot h_{cm}$ , например

$$\ell_k = 0,4 \cdot h_{cm} (\lambda - \text{некоторый коэффициент} - \lambda = \ell_0 / \ell_k);$$

- с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации, рационально критический размер трещины ограничивать величиной  $\ell_k = \lambda \cdot h_{cm}$  в зависимости от категории моделируемого дефекта (например, допустимая глубина вмятины может быть меньше, чем для дефекта типа «непровар»). В процессе подготовки диссертации проводились исследования величины  $\lambda$ , при которых она варьировалась в диапазоне (0,1...0,9). Конкретное значение  $\lambda$  в этом диапазоне принималось в зависимости от точности измерительной аппаратуры;

- поскольку определение механических характеристик металла трубы связано со значительными трудностями, требуемые параметры определяются расчетным путем, в соответствии с рекомендациями, изложенными в нормативной литературе. В частности, значения коэффициентов ( $\alpha, n$ ) рекомендуется принимать для трубных сталей  $\alpha = 2,6 \cdot 10^{-13}$  мм<sup>7</sup>/кгс<sup>4</sup>,  $n=4$  [56].

Следует учитывать, что требования к техническому состоянию ПП значительно более жесткие по сравнению с требованиями к другим участкам линейной части, что характеризует специфику данной диссертации.

После интегрирования (3.6) на отрезке  $(\ell_0; \ell_k)$ , получаем выражение, которое позволяет построить оценку предельного числа циклов нагружения (числа циклов, после которого с допустимой вероятностью возможно разрушение трубы):

$$N_{\text{кр}} = \int_{\ell_{\text{к}}}^{\ell_0} \frac{d\ell}{\alpha \cdot (\sigma \sqrt{\pi \ell})^n} = \frac{1}{\alpha \cdot \sigma^n \pi^{n/2}} \int_{\ell_{\text{к}}}^{\ell_0} \ell^{-n/2} d\ell = \frac{\ell_0^{1-n/2} - \ell_{\text{к}}^{1-n/2}}{\alpha \cdot \sigma^n \cdot \pi^{n/2} \cdot (1 - n/2)}$$

С учетом вышеприведенных рекомендаций ( $n=4$ ), получим:

$$N_{\text{кр}} = \frac{1}{\alpha \cdot \sigma^4 \pi^2} \int_{\ell_{\text{к}}}^{\ell_0} \ell^{-2} d\ell = \frac{\ell_0^{-1} - \ell_{\text{к}}^{-1}}{\alpha \cdot \sigma^4 \cdot \pi^2 \cdot (-1)}$$

Далее будем оперировать величиной

$$N_{\text{кр}} = \frac{1}{\alpha \cdot \pi^2 \cdot \sigma^4} \cdot \left( \frac{1}{\ell_{\text{к}}} - \frac{1}{\ell_0} \right) = \frac{1}{\alpha \cdot \pi^2 \cdot \sigma^4 \cdot \ell_0} \cdot \left( \frac{\ell_0}{\ell_{\text{к}}} - 1 \right) = \frac{\lambda - 1}{\alpha \cdot \pi^2 \cdot \sigma^4 \cdot \ell_0} \quad (3.7)$$

В этом выражении  $\lambda = \ell_0 / \ell_{\text{к}}$ , где  $\lambda$  - отношение начальной глубины трещины к её критической глубине.

В начальном состоянии (после обследования) возможны следующие варианты:

1)  $\ell_0 = 0$  - дефект отсутствует, т.е.  $\lambda = 0$ , поэтому, в соответствии с моделью (3.7) -  $N_{\text{кр}} = \infty$ . Это означает, что в рассматриваемом случае возможна дальнейшая эксплуатация (для данного участка) с учетом анализа всех обнаруженных дефектов и оптимальное планирование сроков и состава ремонтно-восстановительных работ подводного перехода (алгоритм планирования разработан и описан ниже в 4-й главе диссертации);

2)  $\ell_0 = \ell_{\text{к}}$  - размер дефекта достиг критического значения, т.е.  $\lambda = 1$ , поэтому, в соответствии с моделью (3.7) -  $N_{\text{кр}} = 0$ , т.е. в рассматриваемой зоне дальнейшая эксплуатация не разрешается;

3)  $\ell_0 < \ell_{\text{к}}$  - дефект обнаружен, но допустима дальнейшая эксплуатация после дополнительных исследований и расчетов в соответствии расчетами, описанными в 4-й главе диссертации.

Исследуем погрешность результатов, которая может быть при использовании моделей (3.6-3.7)

в выражении (3.7) разделим константы  $(\alpha, \Pi, \pi)$  и переменные  $(\sigma, l_0, l_k)$ .

Введем обозначения

$$C_N = \frac{1}{\alpha \cdot \pi^2}, \quad \Phi(l_0, l_k, \sigma) = \sigma^{-4} \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right),$$

после чего выражение (3.7) преобразуется к виду

$$N_{кр} = \frac{C_N}{\sigma^4} \cdot \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right).$$

Как правило при обследовании ПП используют следующие размерности измеряемых величин:

- напряжения измеряют в Мпа;
- размеры эквивалентной трещины в мм.

После несложных преобразований и подстановки значений постоянных величин получим

$$N_{кр} \approx \frac{4 \cdot 10^{11}}{\sigma^4} \cdot \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right) = 4 \cdot 10^{11} \left\{ \frac{1}{\sigma^4} \cdot \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right) \right\}. \quad (3.8)$$

По аналогии с анализом робастности модели коррозионного износа (3.2) погрешность выходной величины  $\Delta N_{кр}$  модели (3.8) можно представить соотношением:

$$\Delta N_{кр} \approx C_N \cdot \left\{ \left| \frac{\partial \Phi}{\partial l_0} \right| \cdot \Delta l_0 + \left| \frac{\partial \Phi}{\partial l_k} \right| \cdot \Delta l_k + \left| \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right| \cdot \Delta \sigma \right\}. \quad (3.9)$$

С учетом (3.8), первое слагаемое в выражении (3.9) можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned}
\left| \frac{\partial \Phi}{\partial l_0} \right| &= l_0^{-2} \cdot \sigma^{-4} = \left[ \sigma^{-4} \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right) \right] \cdot \frac{l_0^{-2}}{\left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right)} = \Phi(l_0, l_k, \sigma) \cdot \frac{l_0^{-2}}{\left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right)} = \\
&= \Phi(l_0, l_k, \sigma) \cdot \frac{1}{l_0^2 \cdot \left( \frac{l_k - l_0}{l_k \cdot l_0} \right)} = \Phi(l_0, l_k, \sigma) \cdot \frac{l_k \cdot l_0}{l_0^2 \cdot (l_k - l_0)} = \frac{l_k \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma)}{l_0 \cdot (l_k - l_0)}
\end{aligned}$$

Аналогично преобразуем для  $|\partial \Phi / \partial l_k|$ :

$$\begin{aligned}
\left| \frac{\partial \Phi}{\partial l_k} \right| &= l_k^{-2} \cdot \sigma^{-4} = \left[ \sigma^{-4} \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right) \right] \cdot l_k^{-2} = \Phi(l_0, l_k, \sigma) \cdot \frac{1}{l_k^2 \cdot \left( \frac{l_k - l_0}{l_k \cdot l_0} \right)} = \\
&= \Phi(l_0, l_k, \sigma) \cdot \frac{l_k \cdot l_0}{l_k^2 \cdot (l_k - l_0)} = \frac{l_0 \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma)}{l_k \cdot (l_k - l_0)}
\end{aligned}$$

Аналогично преобразуем  $|\partial \Phi / \partial \sigma|$ :

$$\left| \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right| = \left[ 4 \cdot \sigma^{-5} \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right) \right] = \left[ \sigma^{-4} \left( \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_k} \right) \right] \cdot \frac{4}{\sigma} = \frac{4}{\sigma} \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma);$$

С учетом полученных соотношений, выражение (3.9) можно представить в виде:

$$\Delta N_{кр} \approx C_N \cdot \left[ \frac{l_k \cdot \Delta l_0}{l_0 \cdot (l_k - l_0)} + \frac{l_0 \cdot \Delta l_k}{l_k \cdot (l_k - l_0)} + \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma \right] \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma) \quad (3.10)$$

В рамках поставленной задачи рационально использовать относительные погрешности, как входных величин, так и целевого параметра (критического числа циклов).

В данном случае относительные погрешности составляющих в выражении (3.10)

обозначим:  $\mu_0 = \Delta l_0 / l_0$ ,  $\mu_k = \Delta l_k / l_k$ ,  $\mu_\sigma = \Delta \sigma / \sigma$ .

Для упрощения процедуры анализа выходной величины используем значение относительной погрешности критического числа циклов

$$\begin{aligned}
\mu_N(\bullet) &= \frac{\Delta N_{\text{кр}}(l_0, \mu_0, l_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma)}{N_{\text{кр}}(l_0, l_k, \sigma)} = \\
&= \frac{C_N \cdot \left[ \frac{l_k \cdot \Delta l_0}{l_0 \cdot (l_k - l_0)} + \frac{l_0 \cdot \Delta l_k}{l_k \cdot (l_k - l_0)} + \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma \right] \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma)}{C_N \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma)} = \\
&= \frac{l_k \cdot \mu_0}{(l_k - l_0)} + \frac{l_0 \cdot \mu_k}{(l_k - l_0)} + 4\mu_\sigma,
\end{aligned}$$

(3.11)

где

$$\mu_N(\bullet) = \mu_N(l_0, \mu_0, l_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma).$$

В итоге получена зависимость, обладающая определенными преимуществами перед моделью (3.9) - она не зависит от констант, которые адаптируют модель (3.6) к условиям, характерным для расчетов труб магистрального транспорта

$$\mu_N(l_0, \mu_0, l_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma) = \frac{l_k \cdot \mu_0}{(l_k - l_0)} + \frac{l_0 \cdot \mu_k}{(l_k - l_0)} + 4\mu_\sigma.$$

В полученном выражении относительная погрешность  $\mu_N(\bullet)$ , не зависит от уровня напряжений. С другой стороны, можно показать, учитывая выражение (3.11) и получив (3.12), что в правой части соотношения (3.12) уровень напряжения  $\sigma$  используется при вычислении относительной погрешности величины критического числа циклов, но с учетом согласно (3.11)

$$\Delta N_{\text{кр}}(l_0, \mu_0, l_k, \mu_k, \sigma, \mu_\sigma) = \mu_N(\bullet) \cdot N_{\text{кр}}(l_0, l_k, \sigma), \quad (3.12)$$

видно, что в правой части соотношения (3.12) уровень напряжений ( $\sigma$ ) используется при вычислении  $N_{\text{кр}}(l_0, l_k, \sigma)$ , а, значит, влияет на абсолютную погрешность  $N_{\text{кр}}$ .

На этапе предварительного анализа имеет смысл рассматривать вариант, когда все относительные погрешности входных величин сопоставимы, т.е. примерно равны  $\mu_o \cong \mu_\kappa \cong \mu_\sigma \cong \mu$ . Тогда можно записать следующее выражение

$$\begin{aligned} \mu_N(l_0, l_\kappa, \mu) &= \frac{l_\kappa \cdot \mu_o}{(l_\kappa - l_0)} + \frac{l_0 \cdot \mu_\kappa}{(l_\kappa - l_0)} + 4\mu_\sigma \approx \\ &\approx \mu \cdot \left[ \frac{l_\kappa}{(l_\kappa - l_0)} + \frac{l_0}{(l_\kappa - l_0)} + 4 \right] = \\ &\approx \mu \cdot \left[ \frac{l_\kappa + l_0}{(l_\kappa - l_0)} + 4 \right] = \mu \cdot \left( \frac{5l_\kappa - 3l_0}{l_\kappa - l_0} \right). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для формирования предварительных выводов относительно чувствительности модели (3.6) построим графики зависимости (рисунок 3.4) величины  $\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda)$  от остаточной толщины стенки трубы и «сопоставимых» относительных погрешностей входных величин ( $\mu_o \approx \mu_\kappa \approx \mu_\sigma = \mu$ ). Этого будет достаточно, поскольку величина  $\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda)$  линейно зависит от  $\mu$ .

$$\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda) = \mu \cdot \left[ \frac{l_\kappa}{(l_\kappa - l_0)} + \frac{l_0}{(l_\kappa - l_0)} + 4 \right] = \mu \cdot \left( \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} + 4 \right) = \mu \cdot \left( \frac{5 - 3\lambda}{1 - \lambda} \right). \quad (3.14)$$

Где, как было предложено выше,  $\lambda$  - отношение начальной глубины дефекта к расчетной толщине стенки трубы.

В выражении (3.14) относительная погрешность определения числа циклов  $\tilde{\mu}_N(\mu, \lambda)$  зависит только от безразмерных относительных величин, что упрощает анализ.

Графическая интерпретация анализа функции относительной погрешности критического числа циклов в форме (3.14) представлена на рисунке 3.4.



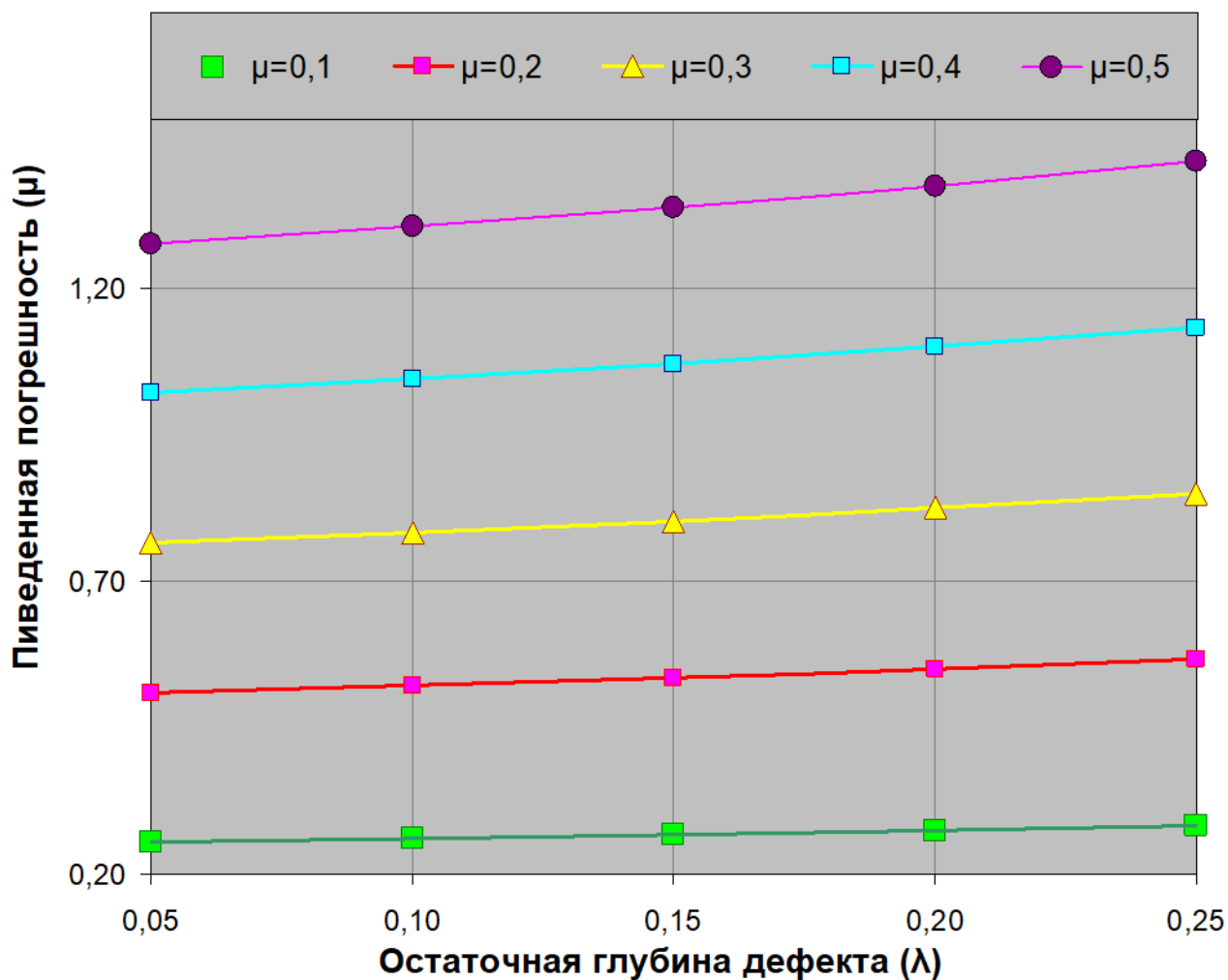


Рисунок 3.4. Зависимость  $\tilde{\mu}_N$  от остаточной толщины стенки трубы  $\lambda$  и относительных (приведенных) погрешностей входных величин  $\mu$

Проведенный анализ функции относительной погрешности критического числа циклов в форме (3.14) и её графической интерпретации (рисунок 3.4) позволяет сделать следующие общие выводы относительно математической модели циклической долговечности:

1) если, в связи с возможными последствиями разгерметизации трубопровода, ограничить величину  $\lambda$  малыми значениями, например,  $0 \leq \lambda \leq 0,3$ , то в этой зоне зависимость  $\tilde{\mu}_N$  от остаточной толщины стенки можно моделировать линейной зависимостью;

2) величина относительной погрешности определения критического числа циклов нагружения  $\Delta N_{кр}$  не зависит от уровня напряжений в окрестности трещины ( $\sigma$ ), но линейно зависит от погрешности этих напряжений ( $\mu$ );

3) размеры усталостной трещины - и начальный, и критический ( $l_0, l_k$ ), влияют на относительную погрешность критического числа циклов ( $\Delta N_{кр}/N_{кр}$ ), но их влияние проявляется в достаточно сложной связи квадратов начального и критического размеров и относительной погрешности их измерения (вычисление);

4) следует иметь в виду, что уровень влияния каждой из этих величин зависит не только от погрешностей измерения, но и от способа получения этой информации: в одном случае это аппаратные методы, в другом – математические и (или) комбинированные;

5) величина относительной погрешности критического числа циклов нагружения ( $\Delta N_{кр}/N_{кр}$ ) включает в себя еще и погрешности используемых при принятии решений значений констант, т.е. погрешности связанные с принимаемыми допущениями;

6) в первом приближении можно ограничиться предлагаемыми результатами исследований, но для совершенствования анализа качества математических моделей прогнозирования технического состояния, а, значит, и эффективности системы ТОР подводных переходов, необходимо развивать парадигмы получения информации, её анализа, алгоритмов и способов обработки.

### 3.3. Анализ робастности математической модели малоциклового усталости подводных переходов

**Робастность** - свойство статистического метода, характеризующее независимость влияния на результат исследования различного рода выбросов (устойчивость к помехам). Робастный метод — метод, направлен на выявление выбросов, снижение их влияния или исключение их из выборки.

### Цели анализа робастности:

- выявление аномальных выбросов;
- исключение из выборки аномальных выбросов;
- снижение влияния недостоверных исходных данных;
- обоснование проведения повторного контроля недостоверных исходных данных (например, данных внешнего и внутреннего обследования подводного перехода);

**Предлагаемый механизм анализа, влияющий на надежность и эффективность мероприятий, гарантирующих безопасность и выбор технологического обеспечения подводных переходов на всех этапах его жизненного цикла:** использовать «латинские квадраты», что позволит сгруппировать результаты обследований и, тем самым, выявить возможные ошибки измерений и оформить результатов с учетом параметров аномальных данных обследования;

- определиться с математической моделью контроля сроков очередного обследования и последующего анализа доступных способов ремонтно-восстановительных работ для узкого круга близких объектов, оптимальных по срокам ввода в эксплуатацию, а также по уровням нагрузки с учетом специфики эксплуатации и технологий сооружения;

- использовать эффективные статистические методы для определения сроков очередного обследования подводных переходов, близких по значениям контролируемых параметров.

Выше была получена математическая модель (3.10) для анализа погрешности вычислений малоцикловой усталости участка трубопровода, имеющего поверхностную трещину

$$\Delta N_{кр} \approx C_N \cdot \left[ \frac{l_k \cdot}{l_0 \cdot (l_k - l_0)} \cdot \Delta l_o + \frac{l_0 \cdot}{l_k \cdot (l_k - l_0)} \cdot \Delta l_k + \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma \right] \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma)$$

При исследовании модели (3.6) был проведен системный анализ влияния всех возможных значений входных параметров модели: как индивидуальных, так и во взаимосвязи.

Модель 3.10 имеет шесть переменных ( $\sigma, \ell_0, \ell_k, \mu_0, \mu_k, \mu_\sigma$ ). В контексте решаемой задачи, при сравнении степени влияния каждой из переменных на погрешность модели и влияния различных композиций переменных, рационально использовать одинаковый уровень относительной погрешности для всех входных величин  $\mu_\sigma, \mu_0$  и  $\mu_k$ , что позволит сократить размерность вектора входных параметров до 4-х.

При системном анализе многомерных математических моделей традиционно используется представление этих моделей в виде математических формул. Но современные средства анализа (при использовании вычислительной техники) предполагают только возможность вычисления значения функций любой размерности при вполне определенных значениях входных величин, т.е. в одной точке пространства заданной размерности.

В предлагаемой диссертации для оценки погрешностей математической модели (3.10) при любых значениях входных констант и переменных разработана программа и её алгоритм реализации, позволяющие определить отклонения результатов расчета ( $N_{кр}$ ), связанных с отклонениями входных величин.

Но, как было отмечено выше, для системного анализа необходимо формальное или статистическое представление модели.

Традиционно при разработке методов прогнозирования технического состояния трубопроводов использовались методы, уже применяемые в авиации (в частности, модели циклической долговечности) [24, 56]. Но, интенсивное развитие вычислительной техники и создания систем хранения и обработки информации позволило накапливать и обрабатывать огромные массивы информации и для формирования выводов использовать современные статистические методы. Главное преимущество такого подхода состоит в том, что при обработке

информации учитываются и явные контрольные параметры, и неявные (которые в настоящее время невозможно контролировать). Указанный метод широко используется, например, в современной медицине. Суть указанного метода сводится к тому, что значительная часть параметров, определяющих ту или иную болезнь, позволяет определить конкретную болезнь на основании накопленного опыта. Этот опыт формализован в виде индивидуальных, обязательных протоколов лечения.

В рамках поставленной задачи для сравнительного анализа влияния погрешности каждой из входных величин и взаимного их влияния в различных композициях, предлагается использовать методику "Рационального планирования эксперимента" [76].

При планировании эксперимента на основании экспертных оценок установлены базовые значения входных величин, т.е. значения основных переменных, относительно которых будем рассматривать возможные отклонения. В зависимости от уровня (в верхней строке таблицы 3.3) приведены номера вариантов уровней переменных, в последующих строках приводятся значения переменных, соответствующих указанным значениям уровней. В случае необходимости, критический размер дефекта будем обозначать в виде  $l_k = l_0 + \Delta$ , где  $\Delta$  - увеличение размера дефекта в процессе эксплуатации (между очередными обследованиями подводного перехода).

Таблица 3.3 – Уровни варьирования основных переменных

Уровни	1	2	3	4	5
$\sigma$ (МПа)	150	200	250	300	350
$l_0$ (мм)	1	1	1	1	1
$l_k$ (мм)	10	11	12	13	14
$\mu$ (%)	2	4	6	8	10

Следующим этапом формирования искомой эмпирической зависимости, согласно функциональной модели является этап "Построение комбинационных квадратов". Предлагаемый вариант комбинационного (латинского) квадрата представлен на рисунке 3.5.

В соответствии с алгоритмом, приведенном в работе [76], главным требованием формирования комбинационного квадрата является требование наличия в каждой строке и каждом столбце базового квадрата только одного заштрихованного элементарного квадрата.

После формирования выбранного варианта комбинационного квадрата формируется рабочая таблица численного эксперимента, в которой объединены результаты планирования эксперимента (результаты обследования ПП).

Для упрощения анализа робастности модели (3.10) оценим влияние погрешностей  $l_o$ ,  $l_k$  и  $\sigma$  (погрешностей входных величин).

		1					2					3					4					5				
$\sigma$	$l_o$	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	1																									
	2																									
	3																									
	4																									
	5																									
2	1																									
	2																									
	3																									
	4																									
	5																									
3	1																									
	2																									
	3																									
	4																									
	5																									
4	1																									
	2																									
	3																									
	4																									
	5																									
5	1																									
	2																									
	3																									
	4																									
	5																									

Рисунок 3.5 – Предлагаемый вариант комбинационного квадрата

Преобразуем соотношение (3.10) к следующему виду

$$\frac{\Delta N_{\text{кр}}}{C_N \cdot \Phi(l_0, l_k, \sigma)} = \frac{l_k \cdot \Delta l_0}{l_0 \cdot (l_k - l_0)} + \frac{l_0 \cdot \Delta l_k}{l_k \cdot (l_k - l_0)} + \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma$$

Преобразуем правую часть и выделим две составляющие в этом выражении:  $\Delta \tilde{N}_\sigma$

и  $\Delta \tilde{N}_\ell$

$$\Delta \tilde{N}_\ell \approx \frac{1}{l_k - l_0} \cdot \left( \frac{l_k \cdot \Delta l_0}{l_0} + \frac{l_0 \cdot \Delta l_k}{l_k} \right) \quad \text{и} \quad \Delta \tilde{N}_\sigma = \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma$$

Таблица 3.4 – Рабочая таблица

№№	Уровни			Входные величин			$\Delta \tilde{N}_\sigma$	$\Delta \tilde{N}_\ell$
	1	2	3	$\sigma$	$l_0$	$l_k$		
1	1	1	1	150	1	14	0,3467	1,0824
2	1	4	2	150	4	11	0,1867	0,4448
3	1	5	3	150	5	12	0,1867	0,4024
4	1	3	4	150	3	13	0,2667	0,4564
5	1	2	5	150	2	10	0,2133	0,6500
6	2	2	1	200	2	14	0,2400	0,5952
7	2	5	2	200	5	11	0,1200	0,4424
8	2	1	3	200	1	12	0,2200	1,0985
9	2	4	4	200	4	13	0,1800	0,3953
10	2	3	5	200	3	10	0,1400	0,5190
11	3	3	1	250	3	14	0,1760	0,4437
12	3	1	2	250	1	11	0,1600	1,1091
13	3	2	3	250	2	12	0,1600	0,6167
14	3	5	4	250	5	13	0,1280	0,3731

15	3	4	5	250	4	10	0,0960	0,4833
16	4	5	1	300	5	14	0,1200	0,3508
17	4	3	2	300	3	11	0,1067	0,4924
18	4	4	3	300	4	12	0,1067	0,4167
19	4	2	4	300	2	13	0,1467	0,6049
20	4	1	5	300	1	10	0,1200	1,1222
21	5	4	1	350	4	14	0,1143	0,3786
22	5	2	2	350	2	11	0,1029	0,6313
23	5	3	3	350	3	12	0,1029	0,4722
24	5	1	4	350	1	13	0,1371	1,0897
25	5	5	5	350	5	10	0,0571	0,5000

В предлагаемом варианте рабочей таблицы выделены составляющие погрешности критического числа циклов:

$$\Delta \tilde{N}_\ell = \frac{l_\kappa \cdot \Delta l_o}{l_o \cdot (l_\kappa - l_o)} + \frac{l_o \cdot \Delta l_\kappa}{l_\kappa \cdot (l_\kappa - l_o)}$$

- составляющая погрешности критического числа циклов, обусловленная величинами линейных параметров возможных дефектов;

$$\Delta \tilde{N}_\sigma = \frac{4}{\sigma} \cdot \Delta \sigma$$

- составляющая погрешности критического числа циклов, обусловленная уровнем напряжений.

В соответствии с приведенной выше таблицей рассмотрим так же вариант, соответствующий минимальному размеру глубины трещины и минимальной величине напряжений, доступных современному оборудованию. Примем за основу  $l_o = 1\text{мм}$  и  $\Delta \sigma = 50\text{ МПа}$ .

Для примера и сравнения рассмотрим фрагмент зависимости погрешностей критического числа циклов, обусловленных значениями  $\Delta N_\sigma$  и  $\Delta N_\ell$ , при уровне



напряжений 350 МПа и  $\ell_0=1$  мм и возможных значениях величины  $\ell_k = \{3; 6; 9; 11$  и  $13\}$  мм, и разности напряжения по кластерам (группам)  $\Delta\sigma=50$  Мпа. Тогда отношение  $\Delta\sigma/\sigma=1/7$ .

По результатам численного эксперимента приведены графики составляющих погрешностей критического числа циклов исследуемой математической модели при уровне напряжений 350 МПа.

Анализы графических зависимостей приведены на рисунках 3.6 и 3.7.

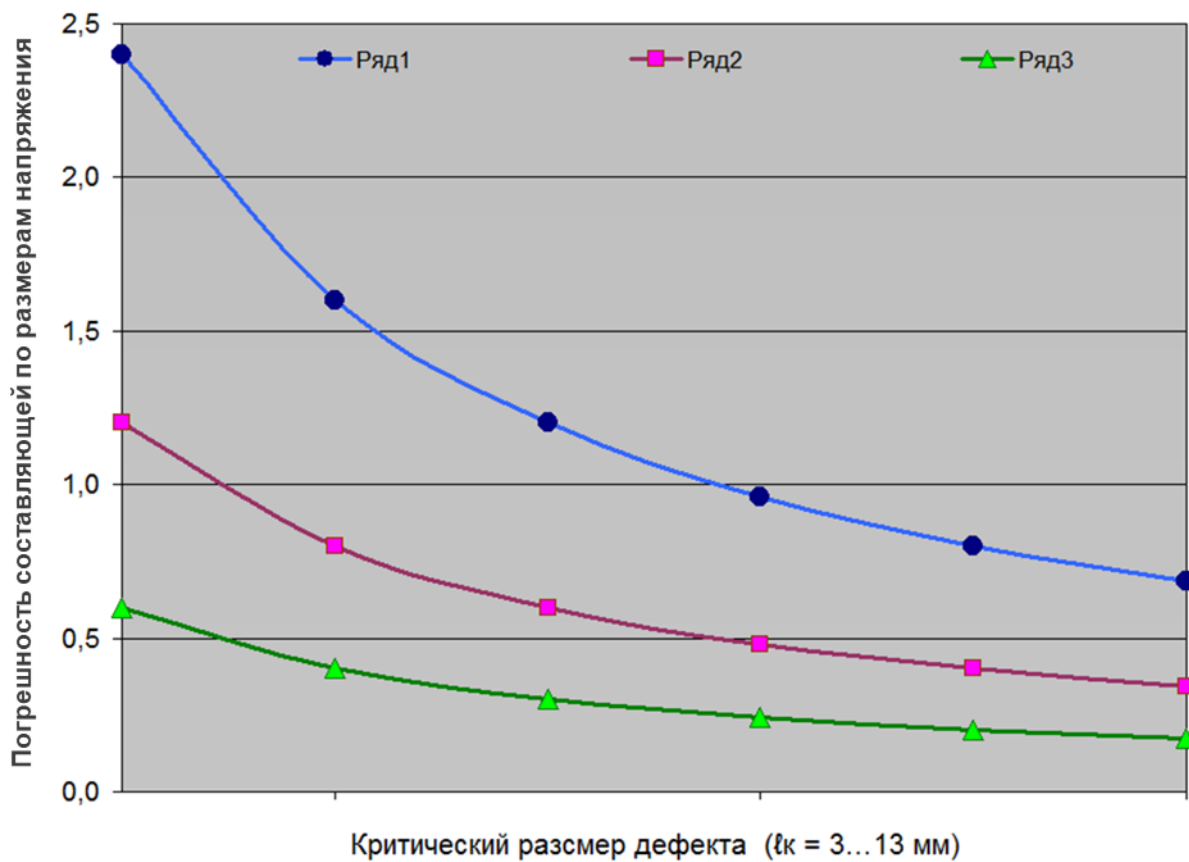


Рисунок 3.6 Составляющая погрешности критического числа циклов по напряжениям ( $\Delta N_\sigma$ ).

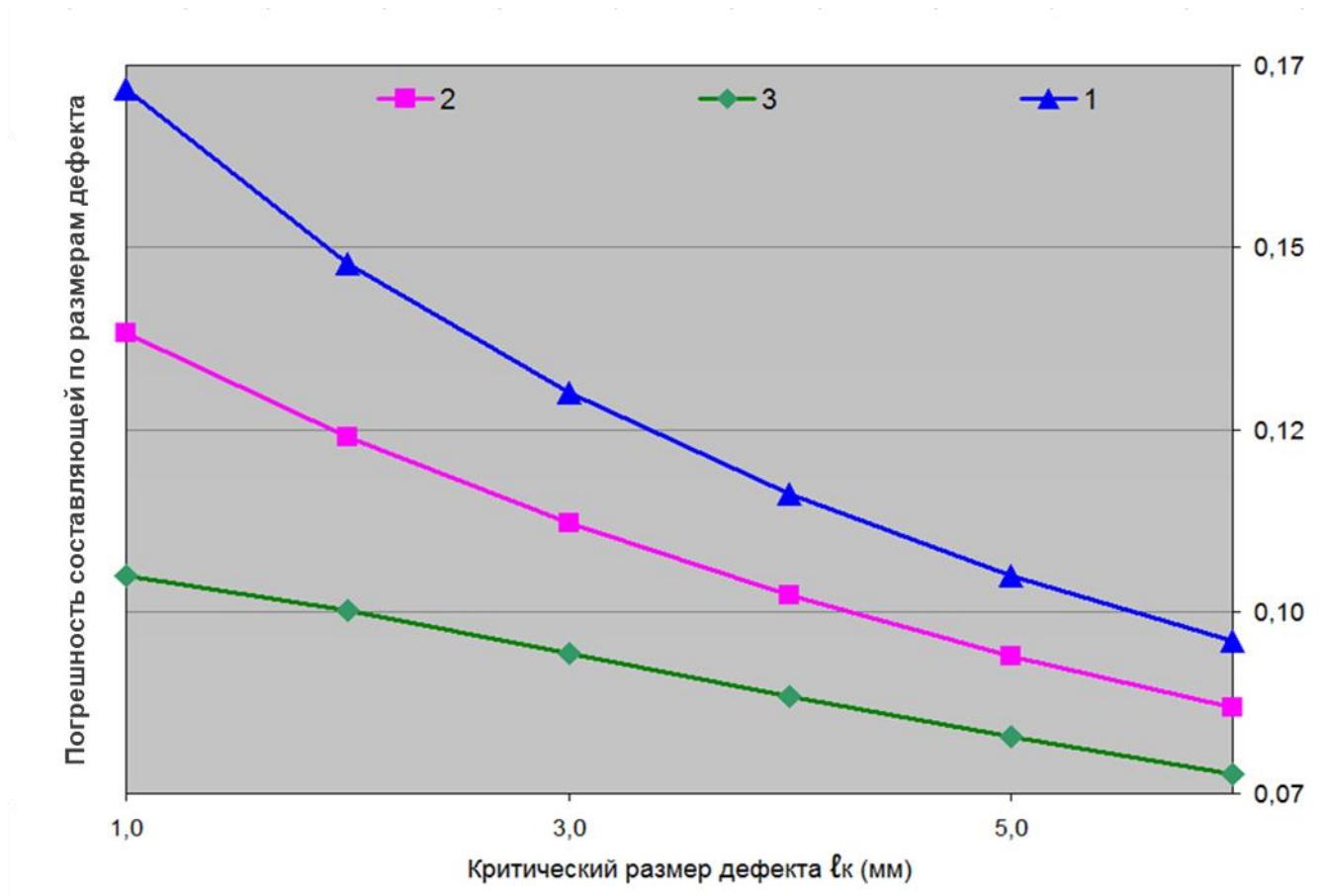


Рисунок 3.7. Составляющая погрешности критического числа циклов по размерам

$$(\Delta \tilde{N}_\ell).$$

Анализ графических зависимостей рисунков (3.7, 3.8) позволяет сделать следующие **выводы**:

1) получены результаты, по которым можно классифицировать исходную информацию по категориям "значимая" и "малозначимая" (соответствующие погрешности 2,5 и 0,17). К категории "значимая" следует относить информацию, которая требует пристального внимания к точности при проведении обследований технического состояния трубопровода. К категории "малозначимая" относится информация, которая не требует пристального внимания к точности при проведении обследований технического состояния трубопровода. Такая информация не предполагает анализ погрешности измерений и может быть представлена при прогнозировании долговечности подводного перехода как

константа, т.е. ее погрешность может приниматься равной нулю (базовое значение берется из таблиц констант);

2) при оценке технического состояния подводного перехода следует использовать простую эмпирическую модель, содержащую в качестве основного параметра напряжения.

3) целесообразно исключать из хранилища аномальную информацию, связанную с возможными ошибками измерений и (или) оформления протоколов обследований.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. При оценке остаточного ресурса ПП, наибольшая точность прогноза будет обеспечена использованием простых эмпирических моделей, полученных на основе статистической обработки больших объемов неструктурированной информации и прошедших проверку на робастность и чувствительность.

2. Получены результаты, по которым можно классифицировать исходную информацию по категориям "значимая" и "малозначимая" (соответствующие погрешности 2,5 и 0,17). К категории "значимая" следует относить информацию, которая требует пристального внимания к точности при проведении обследований технического состояния трубопровода. К категории "малозначимая" относится информация, которая не требует пристального внимания к точности при проведении обследований технического состояния трубопровода. Такая информация не предполагает анализ погрешности измерений и может быть представлена при прогнозировании долговечности подводного перехода как константа, т.е. ее погрешность может приниматься равной нулю (базовое значение берется из таблиц констант).

3. При оценке технического состояния подводного перехода следует использовать простую эмпирическую модель, содержащую в качестве основного параметра напряжения.

4. В расчетах коррозионного износа магистральных трубопроводов по модели (3.2) скорость коррозии можно считать постоянной, т.е. при анализе коррозионного износа подводного перехода рационально использовать математическую модель 3.1.

5. Критическим параметром, характеризующим коррозионный износ стенки подводного перехода, можно считать минимальную толщину стенки в контролируемой зоне (в табл.3.2. это величина  $S_0$  ).

6. Если, в связи с возможными последствиями разгерметизации трубопровода, ограничить величину  $\lambda = \ell_0 / \ell_k$  малыми значениями,  $0 \geq \lambda \geq 0,3$  , то в этой зоне зависимость относительной погрешности определения критического числа цикла  $\tilde{\mu}_N$  от остаточной толщины стенки можно моделировать линейной зависимостью.

## **ГЛАВА 4 ДОСТОВЕРНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ И ФОРМИРОВАНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОСТАВУ И СРОКАМ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА**

### **4.1 О необходимости повышения достоверности математических моделей оценки технического состояния подводных переходов**

В зависимости от результатов оценки технического состояния подводных переходов (ОТС ПП) принимаются решения о сроке и об объеме следующего обследования, по виду необходимого технического обслуживания и ремонта (ТОР), по остаточному ресурсу ПП и его замене. Точное определение вышеназванных характеристик, в основе которого лежит использование достоверных математических моделей, позволяет существенно сократить расходы на ТОР при обеспечении достаточного уровня надежности ПП. Достоверность результатов применения базовых моделей, в свою очередь, зависит от качества исходной информации, от возможности самой модели наиболее полного учета реальных условий эксплуатации подводного перехода.

Традиционные этапы планирования системы технического обслуживания и ремонта перехода нефтепровода можно изложить в следующей последовательности:

а) вначале на основе многочисленных теоретических и экспериментальных исследований условий эксплуатации и изменения характеристик технического состояния подводных переходов разрабатывается полная академическая фундаментальная общая математическая модель оценки технического состояния подводных переходов (ТСПП), содержащая некий ряд составляющих;

б) используя некоторые постоянные коэффициенты, с их помощью данная общетеоретическая модель ТСПП адаптируется к конкретному объекту, т.е. переходят к так называемой полуэмпирической модели ТС ПП;

в) на заключительном этапе, на основе использования полученной полуэмпирической модели осуществляют планирование ТОР ПП: определяют перечень, сроки и объемы соответствующих технических и организационно-технических мероприятий.

К достоинству полуэмпирических моделей следует отнести выявление наиболее влияющих факторов, действующих в данной технико-экономической задаче. Однако очень существенны их недостатки:

- определяется широкий диапазон значений параметров безопасной эксплуатации;
- соответственно, принимаются очень высокие коэффициенты запаса, что влечет за собой большие, чем могли бы быть, затраты на ТОР.

Предлагается новый научно-методический принцип формирования информационно-аналитической системы (алгоритм использования узконаправленных кластеров близких по характеристикам подводных переходов), который позволит создавать эмпирические индивидуальные модели для каждого подводного перехода взамен традиционно используемых полуэмпирических моделей, что позволит существенно сократить расходы на ТОР.

Вероятно, в рамках реализации этого принципа возможны различные решения. В данной диссертации предлагается использовать метод кластерного анализа (кластеризации).

## 4.2 Суть варианта кластерного анализа при моделировании технического состояния подводных переходов

Решаемая в диссертации техническая задача с теоретической точки зрения относится к тому классу задач, где применим многомерный статистический анализ [6,17,22,23,75,123].

Многомерные статистические методы среди множества возможных вероятностно-статистических моделей позволяют обоснованно выбрать ту, которая наилучшим образом соответствует исходным статистическим данным, характеризующим реальное поведение исследуемой совокупности объектов, оценить надежность и точность выводов, сделанных на основании ограниченного статистического материала. Примерами методов многомерного статистического анализа служат: регрессионный анализ, факторный анализ, дискриминационный анализ, кластерный анализ и др.

Достоинством кластерного анализа является тот факт, что он работает даже тогда, когда данных мало и не выполняются требования нормальности распределений случайных величин и другие требования классических методов статистического анализа.

«Кластерный анализ» – это общее название множества вычислительных процедур, используемых при создании классификации. В результате работы с процедурами образуются «кластеры» или группа очень похожих объектов. Более точно, кластерный метод – это многомерная статистическая процедура, выполняющая сбор данных, содержащих информацию о выборе объектов, и затем упорядочивающая объекты в сравнительно однородные группы.

Несмотря на различия в целях, типах данных и примененных методах, все исследования, использующие кластерный анализ, характеризуют следующие пять основных шагов:

- отбор выборки для кластеризации;

- определение множества признаков, по которым будут оцениваться объекты в выборке;
- вычисление значений той или иной меры сходства между объектами;
- применение метода кластерного анализа для создания групп сходных объектов;
- проверка достоверности результатов кластерного решения.

Каждый из перечисленных шагов играет существенную роль при использовании кластерного анализа и прикладном анализе данных.

#### **4.2.1 Концепция кластеризации подводных переходов**

Использование кластерного анализа для решения данной задачи наиболее эффективно. В данном случае кластерный анализ предназначен для объединения подводных переходов в классы (кластеры) таким образом, чтобы в один класс попадали максимально схожие, а ПП различных классов максимально отличались друг от друга. Количественный показатель сходства рассчитывается заданным способом на основании данных, характеризующих ПП. Таким образом, в диссертации под кластеризацией понимается группировка (разбиение множества ПП) на непересекающиеся подмножества (кластеры), состоящие из схожих переходов. Под схожестью (сходством) понимается незначительное отличие (по величине) входных параметров, используемых в процессе прогнозирования технического состояния ПП, описанных в 3-й главе.

Предлагаемая модель обработки информации в информационно-аналитической системе "Подводные переходы" (АИСПП) приведена на рисунке 4.1. Здесь предложен алгоритм использования близких по характеристикам подводных переходов, т.е. модель решения задачи выбора целевого кластера и проблемы достоверности результатов оценки технического состояния подводных переходов. Здесь же предложена структура формирования рекомендаций по составу и срокам проведения ТОР.





Рисунок 4.1 – Алгоритм обработки информации по результатам обследования технического состояния ПП в процессе кластеризации

Обработка информации по результатам обследований технического состояния ПП выполняется поэтапно.

На этапе "Выбор целевого кластера обработки информации" формируется выборка ИАСПП (так называемая целевая выборка), необходимая для формирования заключения о перспективах дальнейшей эксплуатации обследуемого ПП, основанного на формализованном опыте эксплуатации ПП. В выборку объединяются расчетные параметры дефектов, обнаруженных на ПП, которые "близки" по технологии сооружения, длительности и условиям эксплуатации;

На этапе "Анализа достоверности результатов ОТС" отфильтровываются "грубые промахи" информации, полученной при обследованиях технического состояния целевой выборки.

В качестве входных величин в диссертации приняты входные параметры, традиционно используемые при обследованиях технического состояния подводных переходов, описанные во второй главе диссертации, в т.ч.:

$\delta_0$  - начальная толщина стенки на обследуемом участке, мм;

$\delta_{кр}$  - критическая толщина стенки на обследуемом участке, мм;

$V_k$  - скорость коррозии на дефектном участке, мм/год.

$l_0$  - начальный размер усталостной трещины (глубина), мм;

$l_k$  - критический размер усталостной трещины (длина), мм;

$N$  - число циклов нагружения обследуемого участка;

$\sigma$  - нормальные напряжения в окрестности дефекта, МПа;

$\alpha$  и  $n$  - параметры математической модели малоциклового усталости тела трубы ПП.

Периодичность обследований технического состояния ПП определяется действующими нормативными документами ПАО «Транснефть» [35, 67-72], которые регламентируют сроки проведения обследований, их содержание, используемую измерительную аппаратуру и оформление результатов.

Процесс формирования выводов и рекомендаций по результатам обследований оформляется нормативными документами, поименованными выше. Указанная документация архивируется и хранится на протяжении всего жизненного цикла каждого ПП системы нефтепроводного транспорта России.

В настоящее время часть этой информации оцифрована и используется для изучения и обобщения опыта эксплуатации ПП. На основании этого анализа разрабатываются планы НИОКР, целью которых является повышение эффективности эксплуатации ПП.

В предыдущей главе была рассмотрена проблема оценки коррозионной и малоциклового усталости ПП. Проведенный анализ показал, что доступное, в

настоящее время, качество результата трудно назвать высоким, поскольку модели, используемые при прогнозировании технического состояния ПП, связаны с рядом причин, повлиять на которые невозможно.

Рассмотрим и попытаемся изменить модели прогнозирования технического состояния ПП в контексте возможностей, доступных при использовании современных информационных технологий.

Выше уже подчеркивалось, что при разработке заключения о техническом состоянии ПП по результатам обследований используются полуэмпирические модели. В диссертации это модели коррозионной и малоцикловой усталости, которые с определенным уровнем приближения адаптируют академические модели к конкретной предметной области (в данном случае к прогнозированию остаточного ресурса тела трубы подводного перехода вследствие коррозии и/или малоцикловой усталости).

В проведенном анализе научно-технической литературы по указанной проблеме отмечено, что относительная погрешность результатов расчетов может достигать более 1000%, что, в значительной степени, обусловлено спецификой полуэмпирических моделей, в частности, при создании подобных моделей используются максимально возможные диапазоны варьирования входных величин.

Следует отметить, что традиционно используемое в механике разрушения понятие "критический размер трещины" к магистральному трубопроводу неприменимо, так как существующие нормативы в системе магистрального транспорта углеводородов не допускают разгерметизации трубопровода. Поэтому основной целью прогнозирования малоцикловой усталости ПП является предотвращение утечек перекачиваемого продукта, т.е. критическим считается такой размер усталостной трещины, при котором ее глубина достигает толщины стенки трубы на рассматриваемом участке.

На рисунках 4.2 и 4.3 приведены результаты расчетов, иллюстрирующих один из возможных вариантов повышения эффективности системы ТОР подводных переходов, посредством снижения погрешности расчета результатов

прогнозирования. В частности, расчеты показывают, что, например, уменьшение нормируемого параметра "остаточная глубина дефекта" с величины 0,9 до 0,7 (приблизительно на 20%) почти в четыре раза снижает относительную погрешность прогноза (приблизительно на 400%).

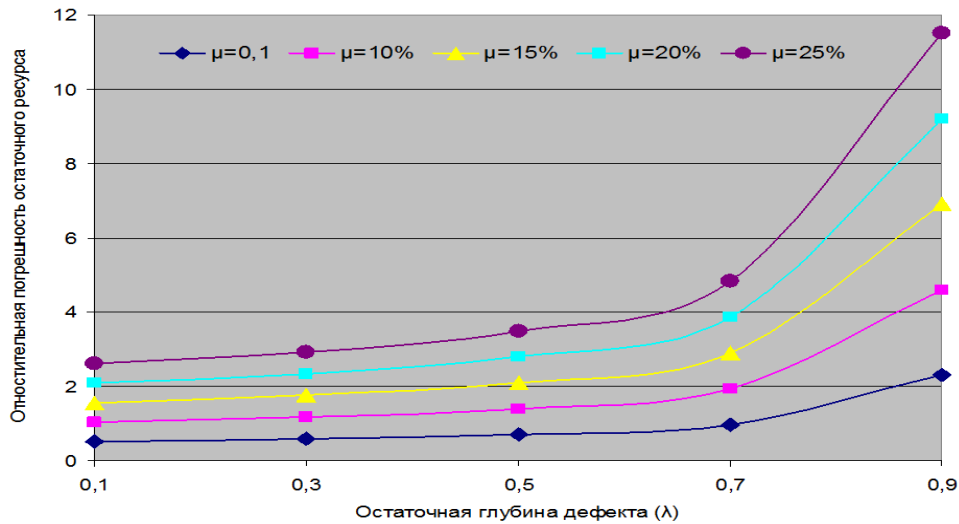


Рисунок 4.2 – Влияние приведенной погрешности входных величин на относительную погрешность расчета остаточного ресурса ПП при остаточной глубине дефекта  $\in (0,1; 0,9)$

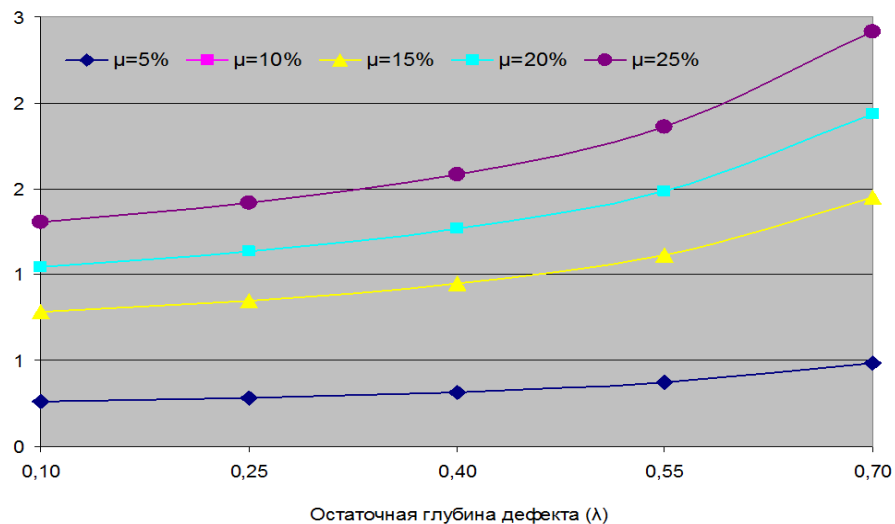


Рисунок 4.3 – Влияние приведенной погрешности входных величин на относительную погрешность остаточного ресурса ПП при остаточной глубине дефекта  $\in (0,1; 0,7)$

На приведенных рисунках видно, что, если ограничивать критическую глубину дефекта, например, на уровне, например, 70% от проектной толщины стенки трубы, относительная погрешность расчета остаточного ресурса уменьшается более чем в 4 раза.

Поэтому в диссертации за основу принимается следующий постулат: "Оптимальный путь к улучшению качества прогнозирования (снижения величины погрешности результатов расчетов) - разработка эмпирических моделей для групп подводных переходов с близкими по величине входными параметрами", выше эта группа ПП была определена как "целевая выборка". Такой подход возможен при наличии существующего (весьма значительного) опыта эксплуатации подводных переходов, реализованного и документированного в форме "результатов обследований технического состояния подводных переходов", что и позволяет существенно улучшить (в несколько раз) качество прогнозов безопасной эксплуатации ПП.

В диссертации предложена модель концепции повышения эффективности эксплуатации подводных переходов (см. рисунок 4.1), соответствующая современному уровню развития технической науки и вычислительной техники. Суть предлагаемого подхода сводится к решению ряда следующих несложных, но очень трудоемких работ, а именно:

- 1) оцифровка всех архивов результатов обследований технического состояния подводных переходов (как эксплуатируемых, так и выведенных из эксплуатации);
- 2) создание общей (вневедомственной) базы данных "Подводные переходы России";
- 3) разработка методов и алгоритмов анализа качества информации по результатам ОТС;
- 4) разработка методов и алгоритмов прогнозирования технического состояния ПП, на основании обобщения опыта их эксплуатации, создания эмпирических моделей планирования мероприятий по ТОР;

- 5) разработка методов и алгоритмов оптимизации сроков и состава ремонтно-восстановительных работ, как по конкретному подводному переходу, так и возможной группировки ПП, по которым планируются мероприятия по ТОР;
- 6) разработка методов и алгоритмов планирования научно технических исследований, направленных на совершенствование системы ТОР подводных переходов.

#### 4.2.2 Формирование целевой выборки данных характеризующих подводные переходы

Согласно вышеприведенному определению кластеров, основным требованием к их формированию является требование их "непересекаемости". Для обеспечения этого требования в диссертации разработана модель группировки дефектов (исходной информации о дефектах), которая приведена на рисунке 4.4.

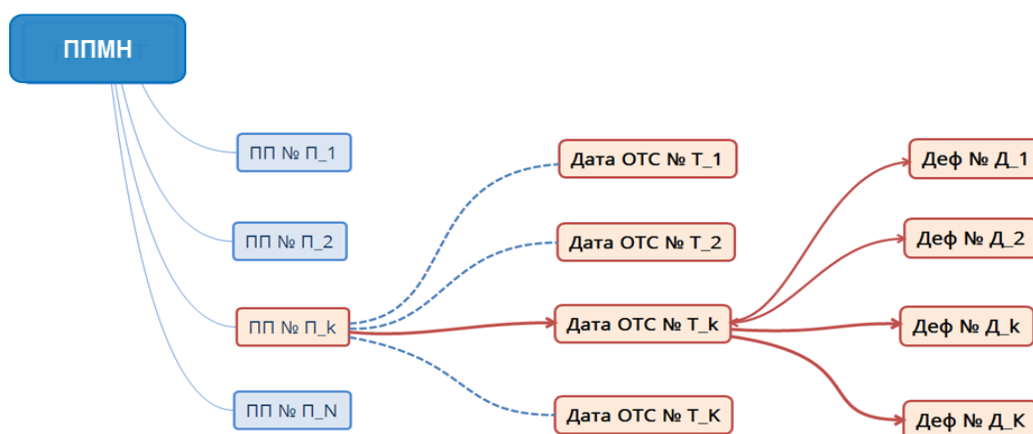


Рисунок 4.4 – Модель формирования кластеров ПП при оценке остаточного ресурса ПП

В качестве ключа доступа к информации о ПП может быть использована следующая информация, в указанной последовательности:

- 1) уникальный номер каждого ПП, зарегистрированного в ИАСПП = (ПП № П\_k);

2) дата обследования технического состояния "ПП № П\_k" ∩ Дата ОТС № Т\_m;

3) координаты дефекта, обнаруженного по итогам обследования "ПП № П\_k" с датой проведения ОТС: «ПП № П\_k" ∩ "Дата ОТС № Т\_m" ∩ "Деф № д\_n".

Будем иметь ввиду, что целью обработки информации по результатам ОТС ПП является выявление дефектов, которые могут привести к разгерметизации трубопровода по завершении расчетного срока эксплуатации (см. рисунок 4.1).

Согласно приведенной выше схеме формирования "ключа доступа" видно, что при каждом обследовании может быть обнаружено множество однотипных дефектов (см. рисунок 4.4). Под "однотипными" понимаются дефекты, сгруппированные по характерным признакам.

Для того чтобы каждый дефект, обнаруженный при обследовании с фиксированной датой обследования, стал уникальным (не повторялся в базе данных ИАСПП, что гарантирует непересекаемость кластеров), предложено маркировать каждый дефект многомерным "ключом доступа к информации" по результатам обследований технического состояния подводных переходов, по которым зафиксирована информации об обследованиях технического состояния, включая и эксплуатируемые ПП, и те ПП, которые выведены из эксплуатации. Хранение и анализ информации о подводных переходах, выведенных из эксплуатации, дает возможность систематизировать, обобщать и совершенствовать методы прогнозирования технического состояния ПП.

На заключительном этапе при формировании выборки является задача "Анализ целевой выборки", в процессе решения которой оценивается объем выборки результатов обследований по следующим критериям:

- 1) выборка должна содержать данные о "близких" ПП:
  - по условиям эксплуатации в области дефектного участка;
  - по технологии изготовления, технологии монтажа и технологии ремонтно-восстановительных работ;

2) выборка должна иметь объем, достаточный для формирования статистически значимых результатов.

Если указанные требования не выполнены, необходимо расширить "ореол выборки", эта операция осуществляется за счет расширения границ по каждой переменной из базы данных (или выборке по определенным критериям). Для формирования целевой выборки достаточного объема, используются стандартные алгоритмы математической статистики, описанные в научно-технической литературе [9,24,25,77,129].

В диссертации предлагается расширение ореола осуществлять по следующему алгоритму:

1) ранжирование входных переменных по степени влияния на целевой параметр (параметр №1, параметр №2, ... параметр №K);

2) расширение ореола по самому значимому параметру (параметру номера "1" в ранжированном перечне входных параметров);

3) если после 1-й операции объем выборки оценивается как "достаточный", процедура расширения ореола завершается, если объем выборки оценивается как "недостаточный", расширение ореола осуществляется дополнительно по параметру номер "2" в ранжированном перечне входных параметров;

4) если после 2-й операции объем выборки оценивается как "достаточный", процедура расширения ореола завершается, если объем выборки оценивается как "недостаточный", расширение ореола осуществляется дополнительно по параметру номер "3" в ранжированном перечне входных параметров;

5) ... и так далее;

б) если после расширения ореола по последнему параметру ранжированного списка входных параметров (параметру №K) условие "достаточности объема" не выполняется, расширение ореола выборки



производится после проведение дополнительных исследований и заключения аналитиков ИАСПП.

### 4.2.3 Предварительный анализ целевой выборки данных по подводным переходам

На этапе предварительного анализа целевой выборки исходная информация оценивается по принадлежности к одному из следующих классов: достоверная, грубый промах, аномальная.

Алгоритм классификации качества целевой выборки и способа хранения результатов обследований технического состояния и способов хранения этой информации в ИАСПП приведен на рисунке 4.5.

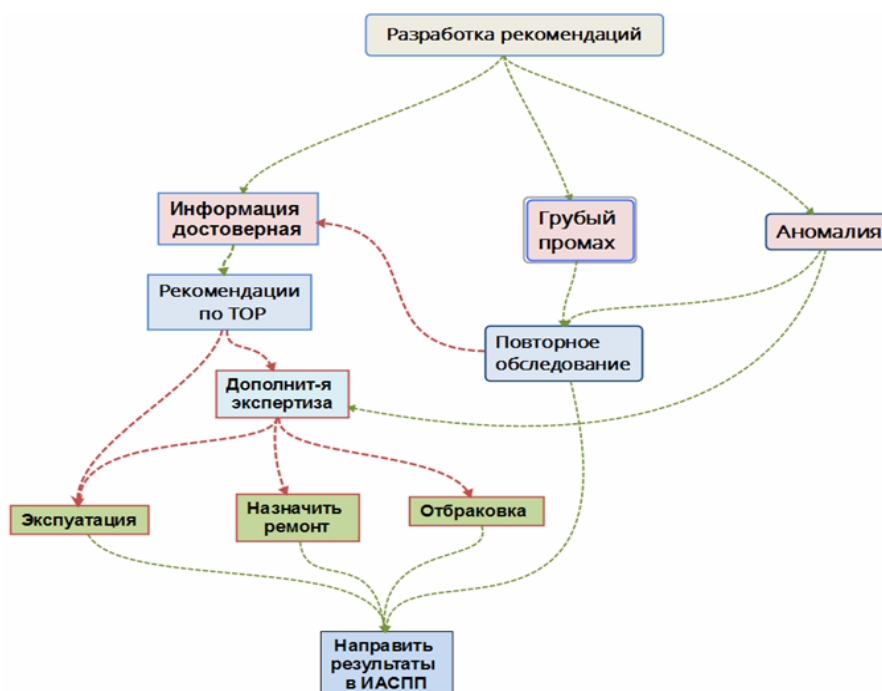


Рисунок 4.5 – Разработка рекомендаций по классификации качества целевой выборки и способа хранения результатов обследований.

**Достоверность информации** – показатель качества информации, означающий её полноту и общую точность. Критериями достоверной информации

являются: отсутствие ложных или искажённых данных, разборчивость речи (как устной, так и письменной), низкая вероятность ошибочного употребления единиц информации (буквы, цифры, символа, бита). Достоверность информации оценивается по шкалам, равно как и источник этой информации (полностью надёжный, чаще всего надёжный, довольно надёжный и так далее до совершенно ненадёжного и того, чей статус не определён).

**Грубая** погрешность или **промах** – это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Источником **грубых** погрешностей нередко бывают ошибки, допущенные оператором во время измерений.

**Дополнительная экспертиза** - это экспертиза, которая проводится при недостаточной ясности или неполноте данного заключения экспертом (комиссией экспертов).

### **4.3 Анализ достоверности результатов оценки технического состояния**

На модели разработки рекомендаций по результатам обследований подводных переходов (см. рисунок 4.5) показано, что на этапе предварительного анализа полученной информации принимается решение о качестве информации об ОТС ПП. По каждому выявленному дефекту полученная информация классифицируется как достоверная, грубый промах или аномальная. При классификации в диссертации предложено использовать два критерия:

- 1) на основании непосредственно результатов ОТС, как текущего, так и всех предшествующих (данного ПП и конкретной дефектной зоны);
- 2) на основании результатов статистического анализа эволюции дефекта по совокупности "близких" дефектных участков (подводных переходов, зарегистрированных в ИАСПП).

В первом случае анализируется первичная информация, на модели 4.1 она обозначена как "технологические параметры" (например, толщина стенки трубы). Во втором случае это - информация, полученная как промежуточная при использовании актуальных математических моделей: на модели 4.1 она обозначена как "динамика контролируемых параметров": (скорость коррозии, константы модели малоциклового усталости и т.п.).

На основании приведенных критериев формируются рекомендации по "Составу и срокам проведения последующих регламентных работ»:

- 1) формирование отчета о достоверности результатов обследований, с указанием качества полученной информации;
- 2) формирование отчета повторного обследования;
- 3) формирование рекомендаций по тонкой настройке моделей прогнозирования по каждой дефектной зоне;
- 4) оформление "Итогового отчета " обследования ПП.

На основании «Итогового отчета" планируются все мероприятия, связанные с организацией работ по дальнейшей эксплуатации, ТОР или замене обследуемого подводного перехода.

#### **4.3.1 Анализ изменения технологических параметров**

Под технологическими параметрами в диссертации понимаются параметры, получаемые посредством измерений в процессе обследования технического состояния подводного перехода (см. главу 2).

**Цель:** создать и исследовать выборку для анализа изменения технологических параметров подводного перехода; зафиксировать изменения, произошедшие в конкретной дефектной зоне конкретного ПП за определенный период времени (... с начала эксплуатации).

**Принимаемые гипотезы:**

1) технология изготовления, сооружения и эксплуатации (...и ремонтно-восстановительных работ) - неизменна (за период времени между обследованиями);

2) в процессе эксплуатации возможны незначительные изменения режима эксплуатации.

Модель формирования необходимой выборки представлена на рисунке 4.6.

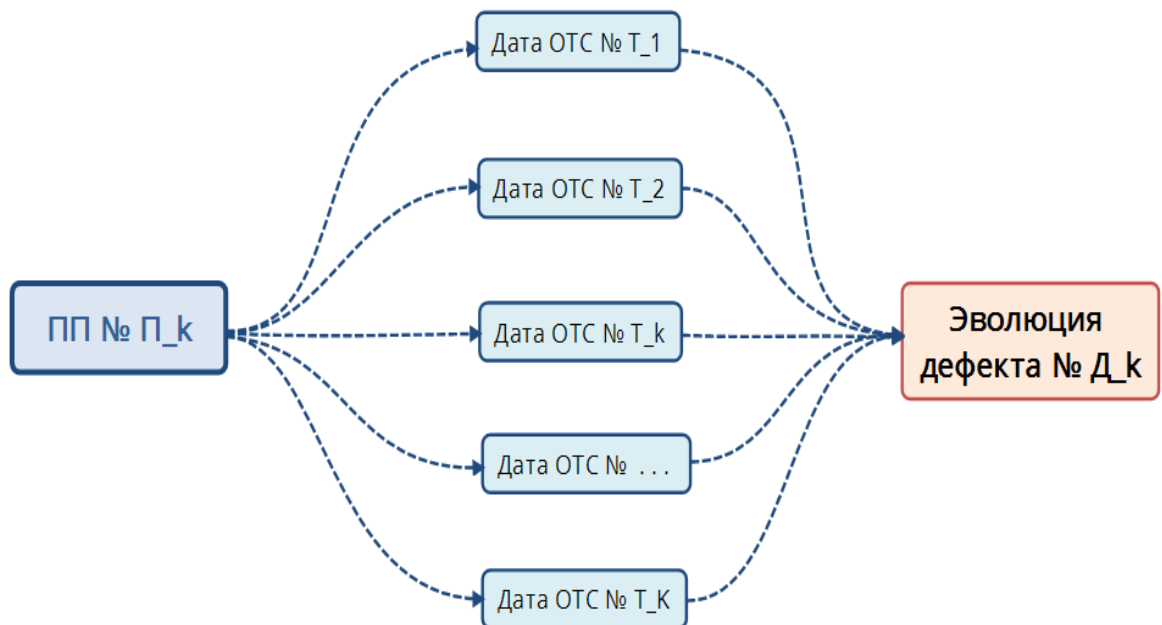


Рисунок 4.6 – Модель алгоритма выборки для анализа изменения технологических параметров подводного перехода

В данном случае анализируется конкретная дефектная зона, конкретного ПП. В принципе возможны различные варианты развития дефекта, например, в дефектной зоне «смещение кромок», со временем может:

- появиться трещина, которая изменяет размеры в процессе эксплуатации;
- существенных изменений не произошло.

Каждый вариант предлагает различные строки и технологии проведения ремонтно-восстановительных работ (РВР):

- либо изменение алгоритма прогнозирования, изменение сроков и состава очередного РВР;
- либо данный дефект рассматривается, как "несущественный", по сравнению с другими обнаруженными дефектами обследуемого ПП.

#### **4.3.2 Анализ изменения косвенных параметров**

Под косвенными параметрами в диссертации понимаются параметры математической модели, позволяющие определять целевые параметры, например, при моделировании коррозионного износа целевым параметром расчетов является время эксплуатации участка ПП, до достижения толщины стенки трубы критического размера. При проведении такого расчета используют различные математические модели. Эти модели оперируют величиной "скорость коррозии", которая рассчитывается по различным методикам с учетом марки стали, из которой изготовлена труба и характеристик перекачиваемой нефти. В других моделях дополнительно используется температура перекачиваемой нефти и/или уровень напряжений на контрольном участке и т.д.

В третьей главе диссертации показано, что при эксплуатации магистрального нефтепровода величина температуры перекачиваемого продукта практически не влияет на результат расчета. В ряде других исследований показано, что и уровень напряжений в трубе не оказывает значимого влияния на величину скорости коррозии. Но во всех исследованиях, посвященных коррозионному износу трубопроводов, используемая величина скорости коррозии определяется расчетным путем, т.е. не получается по результатам прямых измерений. Поэтому параметр "скорость коррозии" в диссертации отнесен к категории "контролируемых параметров".

При расчетах малоциклового усталости (см. главу 3) к косвенным параметрам модели относятся константы  $\alpha$  и  $n$  (параметры, адаптирующие модель для использования в системе транспорта и переработки углеводородов).

### **4.3.3 Тонкая настройка модели прогнозирования (повышение достоверности прогнозирования)**

В процессе развития создаваемой ИАСПП «косвенные параметры» будут заменены параметрами эмпирических моделей, формируемых для каждого кластера, которые в свою очередь, будут автоматически определяться как промежуточные при каждом расчете, в каждом кластере.

Собственно, расчет «косвенных параметров» и является одним из главных модулей этапа «Тонкая настройка модели прогнозирования».

### **4.4 Формирование рекомендаций по техническому обслуживанию и ремонту**

В инженерно-технической литературе под термином ТОР (техническое обслуживание и ремонт) понимается: комплекс операций по поддержанию работоспособности или исправности производственного оборудования при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировке.

В трубопроводном транспорте углеводородов принято в систему ТОР включать следующие основные виды работ: планирование ТОР; обследование технического состояния; ремонтные и восстановительные работы, а также работы, связанные с прекращением эксплуатации подводного перехода (демонтаж, консервация) и, в случае необходимости, проведение сооружения нового ПП.

#### **4.4.1 Концепция планирования сроков мероприятий технического обслуживания и ремонта**

Все работы, связанные с эксплуатацией, осмотрами, планированием ремонтных и/или восстановительных работ на подводных переходах, регламентируются соответствующими нормативными актами. В этих документах устанавливаются: содержание работ, их последовательность, ответственные за исполнение, протоколы выполнения всех назначенных мероприятий, сформулированы основные выводы и рекомендации. Указанные рекомендации связаны с последующей эксплуатацией или необходимостью проведения ремонтных работ, или целесообразностью демонтажа контролируемого перехода и замены последующим сооружением нового подводного перехода (если в этом есть необходимость). Отчеты сохраняются в соответствующих организациях.

Совершенствование методов проведения указанных работ и формирования заключений производилось по мере развития науки, техники и технологий, контролировались отраслевыми исследовательскими институтами, что позволяло по мере появления новых знаний совершенствовать регламенты работ, связанных с эксплуатацией подводных переходов, их техническим обслуживанием и ремонтами. Такой тщательный контроль работоспособности подводных переходов привел, в конечном итоге, к повышению эффективности эксплуатации ПП.

#### **4.4.2 Оптимизация группировки ПП при планировании технического обслуживания и ремонта**

Все работы, связанные с ТОР ПП, являются трудоемкими и затратными, к их подготовке и выполнению привлекаются квалифицированные специалисты, специализированная техника, перемещение которой на большие расстояния требует больших материальных затрат, финансовых ресурсов и времени.

В диссертации предлагается при планировании ТОР ПП выполнять исследования, целью которых является оценка всех возможных (и доступных) решений, в результате можно будет сформировать оптимальный вариант, учитывающий все этапы предстоящих мероприятий по обследованию технического состояния, планированию ремонтных и восстановительных работ и/или демонтажа (если это целесообразно).

Поскольку последовательность работ всех основных этапов ТОР выполняется различными (по назначению) организациями, такое планирование является комплексным и для реализации разработанных планов потребуется координация и согласованная работа подразделений и организаций различного профиля.

Процесс сбора и обработки информации для планирования ТОР ПП должен включать в себя:

1) сбор и анализ всей доступной информации (на электронных носителях и в виде печатных отчетов) по выполненным работам, связанным с ТОР рассматриваемого ПП, с учетом документации по мероприятиям, которые проводились на протяжении всего жизненного цикла этого подводного перехода;

2) формирование целевого кластера, к которому относится рассматриваемый подводный переход, по критериям "близости" (процесс кластеризации описан в пункте 4.1);

3) сбор и анализ информации о расположении обследуемого ПП, необходимой для планирования транспортировки, техники и технологического оборудования, и размещения специалистов;

4) сбор и анализ информации о специфических особенностях расположения и подъездных путей;

5) сбор и анализ информации о близости (или удаленности) предприятий, выпускающих основные габаритные элементы, необходимые для ремонта;



6) анализ информации о местоположении организаций, осуществляющих те или иные работы по техническому обслуживанию и/или ремонтам подводных переходов;

7) анализ информации о близости (или удаленности) местоположения подводных переходов, для которых планируются ТОР на ближайшую перспективу;

8) анализ информации не только об эксплуатируемых подводных переходах, но и о выведенных из эксплуатации, относимые ранее к выбранному кластеру.

При формировании планов по ТОР, анализ рекомендаций по составу предстоящих работ на планируемый период (год, например) выполняется по всем кластерам с последующей оптимизацией затрат на обследование, ремонты и дополнительные перемещения ремонтных бригад, транспортировки техники и необходимых материалов и заработной платы исполнителей работ.

#### **4.4.3 Планирование сроков и состава технического обслуживания и ремонта подводных переходов**

Планирование сроков и состава производится статическими методами, в качестве целевой выборки используется информация целевого кластера, приведенная на рисунке 4.4.

На предварительном анализе целевой выборки вся полученная информация тестируется на наличие "грубых промахов" и аномальных результатов измерений (см. рисунок 4.5).

На основании достоверной информации определяются сроки мероприятий по ТОР. При наличии грубых промахов проводятся повторные измерения, после которых производится планирование ТОР, или, если обнаружена аномальная информация, проводится экспертиза причин и последствий появления аномальных данных. Последняя информация является предметом научных исследований специализированных научных подразделений и институтов.

Если при анализе некоторого дефекта размер кластера признается несостоятельным (по объему необходимой информации), выполняется повторная процедура кластеризации, ориентированная, прежде всего, на близость параметров рассматриваемого дефекта. Т.е. главным приоритетом формирования выборки являются именно характерные размеры дефекта и условия эксплуатации применительно к дефектной зоне. Аналогичные процедуры используются при анализе "аномалий".

#### **4.4.4 Разработка оптимальных планов по срокам и составу технического обслуживания и ремонта**

После этапа планирования сроков и состава РВР, с учетом группировки и логистики для каждого обследуемого подводного перехода, формируется документ с расчетными сроками ремонтных и восстановительных работ по всем обнаруженным дефектным зонам и планируемым профилактическим работам.

Выше подчеркивалось, что все работы по ТОР подводных переходов являются очень трудоёмкими и затратными. Планирование подобных работ на подводных переходах имеет специфическую особенность: часто такие переходы расположены довольно близко друг от друга. Причем затраты на сам ремонт сопоставимы с затратами на перемещения необходимой техники и специалистов. В этой связи в данной отрасли допустимы объединения планов ТОР нескольких переходов. Работы по ТОР можно спланировать таким образом, чтобы суммарные затраты стали минимальными. При этом оптимизируются не только сроки проведения тех или иных работ, но и перемещения бригад специалистов на незначительные (сравнительно незначительные) расстояния с жестким графиком проведения работ на каждом объекте. Выполнение вышеперечисленных условий позволит существенно сократить расходы на проведение плановых мероприятий ТОР. Так, например, практические данные по стоимости обследования и ремонтно-восстановительных работ следующие: обследование участка (3-5 м<sup>2</sup>) для Ду1200 –

порядка 4 млн.рублей, для Ду500 –порядка 1,5 млн.рублей; ликвидация аварий на участке (3-5 м2) составляет (в среднем) для Ду1200 – порядка 12 млн.рублей, для Ду500 – порядка 4 млн.рублей; средняя стоимость ремонта ППМН для Ду1200 – порядка 18 млн.рублей, для Ду500 – порядка 6 млн.рублей. Анализ данных показывает, что оптимизация планирования работ по обследованиям и РВР по срокам проведения и перемещения бригад специалистов, а также рациональное использование технических средств снижает затраты на 30-40% в зависимости от конкретных условий производственных задач.

Следует иметь в виду, что допустима только коррекция расчетных промежутков между проведением ТОР в сторону уменьшения, что должно уменьшить затраты на проведение ТОР на протяжении жизненного цикла ПП. Но при этом возникнет потребность в создании более совершенных методов контроля технического состояния ПП и технологии ТОР и нормативной базы проектирования, сооружения и эксплуатации ПП, что несомненно положительно скажется на экологической обстановке в окрестности трубопровода.

Это существенно снизит эксплуатационные расходы, связанные с восстановлением экологической ситуации рек и прилегающих районов.

Доработка регламентов организации (например, ПАО «Транснефть») будет происходить по мере накопления повторяющихся материалов.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Разработан алгоритм использования узконаправленных кластеров близких по характеристикам подводных переходов, позволяющий уточнить и удешевить решения, принимаемые на основе обработки больших объемов базы данных неструктурированной информации с применением цифровых технологий.

2. Предлагается использовать современные цифровые методы сбора, обработки и хранения информации, связанной с эксплуатацией и ТОР.

3. Предлагается основные выводы по эксплуатации ПП формировать не по общей массе доступной информации, а по группе ПП с близкими значениями значимых параметров, характеризующих стадии проектирования, сооружения и эксплуатации (кластеризация).

4. Для решения задач где применим многомерный статистический анализ выбран метод кластеризации, достоинством кластерного анализа является то, что он работает даже тогда, когда данных мало и не выполняются требования нормальности распределений случайных величин и другие требования классических методов статистического анализа.

5. Установлено, что оптимизация ореола кластеризации с целью обеспечения необходимого объема выборки и минимального размаха контролируемых параметров может в 4 раза снизить относительную погрешность прогнозирования остаточного ресурса ППМН и уменьшить эксплуатационные расходы на 30-40%.

6. Разработан алгоритм сбора и обработки исходных данных для совершенствования планирования технического обслуживания и ремонта подводных переходов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ факторов, определяющих эффективность и работоспособность ППМН показал, что в существующей системе определения технического состояния подводных переходов, основой является принцип нормирования, который учитывает многие реальные факторы, может быть даже излишние, вносящие погрешности в расчеты и выводы, для повышения точности расчетов необходима полноценная база данных по каждому переходу в соответствии с этапами его жизненного цикла.

2. Разработан алгоритм информационной поддержки принятия решений по установлению характеристик технического состояния подводных переходов и математических моделей по его описанию, повышающий достоверность результатов на основе учета самых значимых составляющих - уровня качества проектирования дефектов строительного периода и особенностей эксплуатации каждого конкретного перехода.

3. При оценке остаточного ресурса подводного перехода, наибольшая точность прогноза будет обеспечена использованием простых эмпирических моделей, полученных на основе статистической обработки больших объемов неструктурированной информации и прошедших проверку на робастность и чувствительность.

4. Разработан алгоритм использования узконаправленных кластеров близких по характеристикам подводных переходов, позволяющий уточнить и удешевить решения, принимаемые на основе обработки больших объемов базы данных неструктурированной информации с применением цифровых технологий. Установлено, что оптимизация ореола кластеризации с целью обеспечения необходимого объема выборки и минимального размаха контролируемых параметров может в 4 раза снизить относительную погрешность прогнозирования остаточного ресурса ППМН и уменьшить эксплуатационные расходы на 30-40%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллин И.Г. Коррозионно-механическая прочность нефтегазовых трубопроводных систем: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. Уфа, 1987. – 43 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: Программированное введение в планирование эксперимента. М.: Наука, 1971. – 284 с.
3. Альчиков В. В. Аналитические решения для магнитостатических полей при некоторых видах коэффициентов. Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 10. С. 84-88.
4. Андреева Е.Г., Шамец С.П., Колмогоров Д.В. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS/Нефтегазовое дело 2004. С. 25-28.
5. Афанасьев, Ю.В. К оценке угловых погрешностей 3-х компонентного магнитометра. Геофизическая аппаратура. 1984. Вып.79. С. 13-19.
6. Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.П. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1971. – 77 с.
7. Березин В.Л., Бородавкин П.П., Захаров И.Я., Ясин Э.М. Вопросы проектирования, монтажа и укладки подводных трубопроводов. ТНТО. - М.: ВНИИОЭНГ, 1974. – 72 с.
8. Березин Л.В. Методология оценки технического состояния и обеспечения работоспособности подводных трубопроводов. Дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. Москва, 2004. – 210 с.
9. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. Пер. с англ.- М.: Мир, 1989. – 344 с.
10. Боровик Е.С. Лекции по магнетизму/ Е.С. Боровик, В.В. Еременко, А.С. Мильпер. 3-е изд. - М.: ФИЗМАТГИЗ, 2005. – 512 с.

11. Бородавкин П.П., Шадрин О.Б., Черняев Д.А. Вопросы проектирования и эксплуатации подводных переходов нефте- и продуктопроводов / Научно-технический обзор. - М.: 1966. – 92 с.
12. Бородавкин П.П., Шадрин О.Б. Вопросы проектирования и капитального ремонта подводных переходов трубопроводов. М.: ВНИИОЭНГ, 1971. – 84 с.
13. Бородавкин П.П. Подводные трубопроводы / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин, О.Б. Шадрин. – М.: Недра, 1979. 415 с.
14. Борцов А.Р. Технология строительства и методы расчета напряженного состояния подводных трубопроводов "труба в трубе": дис. канд. технических наук, Москва, 1984.
15. Бозм Б. Инженерное проектирование программного обеспечения. -М.: Радио и связь,1985. – 511 с.
16. Буренин Д.В. Оценка качества исходной информации в расчетно-аналитических комплексах. – Уфа: Фонд содействия развитию научных исследований, 1997.
17. Бусленко Н.П. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло).
18. Быков Л.И. Типовые расчеты при проектировании, строительстве и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие / Л.И. Быков, Ф.М. Мустафин, С.К. Рафиков, А.М. Нечваль, И.Ш. Гамбург. – СПб.: Недра, 2011. – 748с.
19. Варламов, Д.П. Прогнозирование рисков безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов, склонных к коррозионному растрескиванию под напряжением: автореф. дис. док. тех. наук: – М.,2014. – 36 с.
20. Васильев Г.Г. Практические аспекты повышения надежности подводных переходов магистральных трубопроводов / Г.Г. Васильев, Ю.А. Горяинов, В.К. Иванец, И.Л. Садова // Промышленный сервис. – 2012. - №2. – С. 21-23.

21. Вахитов, А.Г. Разработка методов расчета прогнозируемого и остаточного ресурса нефтегазового оборудования и трубопроводов с учетом механохимической коррозии и неоднородности [Текст] / А.Г. Вахитов. – Уфа, 2003.
22. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Недра, 1969. – 576 с.
23. Вероятностные методы в вычислительной технике. Учеб. Пособие для вузов по спец. ЭВМ. /А.В. Крайников, Б.А. Кудриков, А.Н. Лебедев и др.; Под ред. А.Н Лебедева и Е.А. Чернявского. –М.: Высш.шк., 1986. – 326 с.
24. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента. (Справочник)/ Кузнецов А.А., Ветров В.И. и др.- М.: Машиностроение,1970. – 567с.
25. Вознесенский В. А., Ковальчук А. Ф. Принятие решений по статистическим моделям. М.: Статистика, 1978. – 192 с.
26. Воробьев А.З., Олькин Б.И., Стебеньев В.Н. и др. Сопротивление усталости элементов конструкций М.: Машиностроение, 1990. –24 с.
27. ВСН 010-88. Строительство магистральных трубопроводов. Подводные переходы. - М.: ВНИИСТ, 1989.
28. ВСН 163-83. Учет деформаций речных русел и берегов, водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). - Л.: Гидрометеиздат, 1985.
29. ВСН 2-118-80. Инструкция по строительству подводных переходов магистральных трубопроводов. - М.: ВНИИСТ, 1980.
30. Галюк В.Х., Забела К.А. Ликвидация повреждений подводных переходов магистральных нефтепроводов / Обзорн. информ. Серия "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов". – М.: ВНИИОЭНГ, 1980. – 68с.
31. Галюк В.Х., Забела К.А., Гольдин Э.Р. Водолазные работы при обследовании и ремонте подводных нефтепроводов / Обзорн. информ. Серия "Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов". – М.: ВНИИОЭНГ, 1978. – 56 с.



32. Глаголев, М.В. Анализ чувствительности модели / М.В. Глаголев // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2012. – №3. – С. 31-53.
33. Гликман Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов. –М. – Л. Машгиз, 1975. – 176 с.
34. Гоник А.А. Коррозия нефтепромыслового оборудования и меры ее предупреждения. - М.: Недра, 1967.
35. ГОСТ Р52330-2005. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования.
36. ГОСТ 17102-71. Качество продукции.Классификация продукции по качеству и виды дефектов.Термины и определения.
37. Гумеров А.Г., Азметов Х.А., Гумеров Р.С. Техническая эксплуатация подводных трубопроводов. - М.: НЕДРА, 2003. – 300 с.
38. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. - М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
39. Гусев А.С., Светлицкий В.А. Расчет конструкций при случайных воздействиях. - М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
40. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1979.
41. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. - М.: Металлургия, 1981. – 270 с.
42. Гутман Э.М., Зайнуллин Р.С., Шаталов А.Т. и др. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа – М.: Недра, 1984. - 76 с.
43. Дудников Ю.В. Научные основы проектирования и обеспечения безопасности сложных участков линейной части магистральных нефтепроводов / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Уфа, 2012. – 366 с.

44. Забела К.А. Ликвидация аварий и ремонт подводных трубопроводов. - М.: Недра, 1986. – 148с.
45. Забела К.А., Красков В.А., Москвич В.М., Сощенко А.Е. Безопасность пересечений трубопроводами водных преград. под общ. ред. К.А. Забелы. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 195 с.
46. Захаров И.Я., Ращепкин К.Е. Заглубление подводных трубопроводов при ремонте переходов/Труды НИИТранснефть. - 1965. -Вып. IV. С. 278-283.
47. Захаров И.Я., Ращепкин К.Е., Ясин Э.М. К расчету напряженного состояния подводного трубопровода // Транспорт и хранение нефти: НТС. - М., 1963. - № 12. - С. 6-10.
48. Ибрагимов А.А. Методы прогнозирования долговечности трубопроводов с учетом коррозии и переменных напряжений /А.А.Ибрагимов; под науч. ред. А.Б.Шабарова, С.Ю.Подорожникова. -Тюмень:ТюмГНУ, 2011. -76 с.
49. Идрисов Р.Х. Обеспечение надежности и безопасности подводных переходов магистральных нефтепроводов / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Уфа: ГУП “ Институт проблем транспорта энергоресурсов”, 2002. – 42 с.
50. Кагаев В.В., Махутов Н.А., Гусейнов А.П. Расчеты деталей машин конструкций на прочность и долговечность. - М.: Машиностроение,1985. 224 с.
51. Каталог типовых технологических схем ремонта подводных переходов магистральных нефтепроводов. - Уфа: ВНИИСПТнефть, 1986.
52. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. - 364 с.
53. Кожаева К.В. Методы расчета продольной устойчивости трубопровода и меры по её обеспечению на участке подводного перехода / К.В. Кожаева, Ф.М. Мустафин, Д.Е. Якупова // Журнал «Нефтяное хозяйство». – 2016. - №1109 – С. 102-104.
54. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 624 с.

55. Колосова Н.М. Исследования условий работы и способов ремонта подводных переходов трубопроводов Западной Сибири // Автореф. канд.техн. наук. - М., 1980. - 22 с.
56. Кузнецов А.А., Алифанов О.М. и др. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента. (Справочник), - М.: Машиностроение, 1970. - 567 с.
57. Кузнецов, М.В. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров / М.В. Кузнецов, В.Ф. Новоселов, П.И. Тугунов, В.Ф. Котов. - М.: Недра, 2010. – 238 с.
58. Кукушкин Б.М., Канаев В.Я. Строительство подводных трубопроводов. - М.: Недра, 1982. - 173 с.
59. Кульбей А.Г. Разработка методики оценки технического состояния подводных переходов магистральных трубопроводов Беларуси / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Москва. – 2009. – 140 с.
60. Куценко К.В. Диагностика и расчет устойчивости трубопровода на участке подводного перехода / К.В. Куценко, Ф.М. Мустафин // Журнал «Газовая промышленность» - 2013. - №700. – С. 41-43.
61. Левин С.И. Подводные трубопроводы. - М.: Недра, 1970. - 288 с.
62. Литвин И.Е. Обеспечение работоспособности трубопроводов, эксплуатируемых в водных средах / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: РГУ Нефти и газа И.М. Губкина, 2002. – 250 с.
63. Мансуров М.Н. Влияние донных насосов и дампинга грунта на устойчивость морских подводных трубопроводов // М.Н. Мансуров, Т.И. Лаптева, Л.А. Копаева // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». – 2013. – № 3(14). – С. 119-124.
64. Мазур И.И.,Иванцов О.М.Безопасность трубопроводных систем.- М.:Елима,2004.-1099с.
65. Махутов Н.А., Воробьев А.З., Гаденин М.М. и др. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. - М.: Наука, 1983. - 271 с.

66. Никущенко Д.В. Математическое моделирование движения подводного объекта на основе методов вычислительной гидродинамики: дис. доктора технических наук, Санкт-Петербург, 2011.
67. ОР-35.240.50-КТН-106-11. Порядок эксплуатации автоматизированной информационно-аналитической системы контроля технического состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов 2011 г.
68. ОР-23.040.00-КТН-311-09 Порядок ведения паспортов на переходы магистральных нефтепроводов через водные преграды.
69. ОР-91.200.00-КТН-074-12 Порядок организации и осуществления строительного контроля за соблюдением проектных решений и качеством строительства подводных переходов МН и МНПП.
70. ОР-23.040.00-КТН-134-13. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Паспорт перехода магистрального нефтепровода и нефтепродуктопровода через водную преграду.
71. ОР-75.200.00-КТН-231-16. Магистральный трубопроводный транспорт нефти нефтепродуктов. Порядок технической эксплуатации переходов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов через водные преграды и малые водотоки.
72. ОР-35.240.00-КТН-105-17. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Порядок подготовки и принятия решения о создании или модернизации информационной системы.
73. Отт К. Ф. Стресс коррозия на газопроводах. Гипотезы, аргументы и факты/ Обз. Инф. Сер. Защита от коррозии оборудования в газовой промышленности. -М.: ИРЦ Газпром, 1998. -73 с.
74. Пахотин П.А. Современная методика диагностики подводных переходов
75. Поляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М., 1971.

76. Протоdjаконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов. Сектор физико-технических проблем ИФЗ им. О. Ю. Шмидта. М.: Изд-во АН СССР. - 1972.

77. Райфа Г., Шдейфер Р. Прикладная теория статистических решений. – М.: Статистика, 1977.

78. РД 153-394-067-00. Методы ремонта дефектных участков действующих магистральных нефтепроводов. М.: ОАО «АК «Транснефть», ЦТД, 2000.

79. РД 153-39-4-074-01. Инструкция по ликвидации аварий и повреждений на подводных переходах магистральных нефтепродуктопроводов. М.: ОАО АК «Транснефтепродукт», 2001.

80. РД 39-00147105-024-02. Методика расчета напряженного состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов при техническом обслуживании и ремонте. — Уфа: ТрансТЭК, 2001.

81. РД 39-0147-103-345-86. Инструкция по контролю при строительстве, приемке и эксплуатации подводных переходов магистральных нефтепроводов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1986.

82. РД 39-0147103-347-89. Инструкция на технологический процесс приборного обследования подводных переходов трубопроводов и кабелей связи. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1991.

83. РД 39-0147103-370-86. Нормы на проектирование капитального ремонта подводных переходов магистральных нефтепроводов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987.

84. РД 39-0147103-372-86. Инструкция по обследованию коррозионных состояний магистральных нефтепроводов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1987.

85. РД 39-30-1060-84. Инструкция по обследованию технического состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов. Уфа: ВНИИСПТнефть, 1984.

86. РД-23.040.00-КТН-104-13 Технические решения для проектирования инженерной защиты линейной части магистральных трубопроводов от водной эрозии, размывов и оголений

87. РД-23.040.00-КТН-265-10 Оценка технического состояния магистральных трубопроводов на соответствие требованиям нормативно-технических документов. -М.: ОАО "АК "Транснефть", 2010.

88. РД-24.040.00-КТН-062-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Магистральные нефтепроводы. Норма проектирования. - М.: ОАО "АК "Транснефть", 2014.

89. РД-75.200.00-КТН-012-14. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Переходы магистральных трубопроводов через водные преграды. Нормы проектирования.

90. РД-91.040.00-КТН-308-09 Строительство подводных переходов нефтепроводов способом наклонно-направленного бурения

91. Рохваргер А.Е., Шевяков Л.Ю. Математическое планирование научно-технических исследований. М.: Наука, 1975. - 440 с.

92. Сайфутдинов, А.И. Робастность математических моделей оценки долговечности подводных переходов нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. – № 4. – С. 67-72.

93. Сайфутдинов, А.И. Анализ технического состояния подводных переходов магистральных нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // 66-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. конф. – Кн.1. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2015. – С. 181-183.

94. Сайфутдинов, А.И. Безаварийная эксплуатация подводных переходов МНП / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // Neftegaz.RU. – 2018. – № 12. – С. 48-51.

95. Сайфутдинов, А.И. Информационная поддержка системы управления надежностью и эффективностью подводных переходов магистральных нефтепроовдов/ А.И. Сайфутдинов, С.А. Будников // Материалы X международной

учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2015». – Том 1. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2015. – С. 290-293.

96. Сайфутдинов, А.И. К вопросу разработки системы управления надежностью и эффективностью подводных переходов магистральных нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, С.А. Будников // 66-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. конф. – Кн.1. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2015. – С. 183-185.

97. Сайфутдинов, А.И. К проблеме расчета остаточного ресурса длительно эксплуатируемых подводных переходов магистральных нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2017. – № 5. – С. 24-27.

98. Сайфутдинов, А.И. Обеспечение эффективности эксплуатации подводных переходов нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, Г.В. Кудоярова // Научные технологии в решении проблем нефтегазового комплекса: материалы Международной молодежной научной конференции – Уфа: РИЦ БашГУ. – 2016. – С. 235-237.

99. Сайфутдинов, А.И. Определение параметров балластировки / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // 65-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. конф. – Кн.1. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2014. – С. 91-94.

100. Сайфутдинов, А.И. Повышение эффективности управления техническим состоянием подводных переходов на основе анализа исходной информации / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // 67-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб.матер.конф.; редкол.: Р. А. Исмаков и др. – Уфа: Издательство УГНТУ. – 2016. – Кн. 1. – С. 472-473.

101. Сайфутдинов, А.И. Прогнозирование времени безопасной эксплуатации подводных переходов нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // Трубопроводный транспорт – 2016: материалы XI Международной

учебно-научно-практической конференции / – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2016. – С. 132-134.

102. Сайфутдинов, А.И. Расчет обеспеченных расходов воды обследуемого перехода на примере подводного перехода магистрального нефтепровода «САЛАВАТ-ОРСК» через р. Белая / А.И. Сайфутдинов // 64-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. конф. – Кн.1. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2013. – С. 40-41.

103. Сайфутдинов, А.И. Характеристики и основные работы по проведению диагностики подводных переходов на примере перехода магистрального нефтепровода «САЛАВАТ-ОРСК» через р. Белая / А.И. Сайфутдинов // 64-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. матер. конф. – Кн.1. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2013. – С. 38-40.

104. Сайфутдинов, А.И. Этапы создания системы управления надежностью и эффективностью подводных переходов магистральных нефтепроводов / А.И. Сайфутдинов, С.А. Будников // Материалы X международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2015». – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2015. – С. 240-242.

105. Сайфутдинов, А.И. К проблеме оценки технического состояния малоинформативных объектов / А. И. Сайфутдинов, К.Ш. Ямалетдинова, А.П. Янчушка // Успехи современного естествознания. 2019. №12(часть2)-С.315-320.

106. Сайфутдинов, А.И. Автоматизированный мониторинг коррозионного состояния подводных переходов / А.И. Сайфутдинов, Г.Е. Коробков // Материалы IX международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2013». – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2013. – С. 166-168.

107. Сайфутдинов, А.И. О русловых процессах и планово-высотных деформациях русла в районе подводного перехода / А.И. Сайфутдинов // Материалы VIII международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2012». – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2012. – С. 173-175;



108. Сайфутдинов, А.И. Мониторинг подводных переходов / А.И. Сайфутдинов // Материалы VIII международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2012». – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2012. – С. 171-173.
109. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / Под ред. В.Е. Селезнева. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.
110. Серенсен С.В. Усталость материалов и элементов конструкций. – Киев: Наукова Думка, 1985. - Т.2. - 256 с.
111. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М., Гусейнов Л.П. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытаний. - М.: Наука. 1975.- 286 с.
112. Сидоренко, В.Г. Оценка ресурса участков трубопроводов, подверженных Интенсивной пульсации давлений: автореф. дис. канд. тех. наук: 08.04.01 / Сидоренко Валентина Геннадьевна. - Санкт-Петербург, 2016. 46 с.
113. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат, 1985.
114. СНиП 2.05.06-85\*. Магистральные трубопроводы. - М.: Стройиздат, 1997.
115. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). - М.: Стройиздат, 1983.
116. СНиП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (Волновые, ледовые и от судов). М.: Минстрой России ГУП ЦПП, 1996.
117. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках. ГОСТ 25859-83 (СТ СЭВ 3648-82). РД 155-74. Рекомендации по повышению работоспособности сварных соединений магистральных трубопроводов. Введ. 01.03.74 до 01.03.77. – М: ЦНТИ ВНИИСТа, 1974.

118. СП 33-101-2003 Система нормативных документов в строительстве. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
119. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\*.
120. Спектор Ю.И., Пережогин Ю.Д., Ратнер А.Г. Защита размываемых участков трубопроводов на подводных переходах через малые водные преграды с помощью гибких конструкций на основе геосинтетиков. -Уфа: Гилем, 2000. -114 с.
121. Спектор, Ю. И. Строительство подводных переходов трубопроводов способом горизонтально направленного бурения: Учеб. пособие / Ю.И. Спектор, Ф.М. Мустафин, А.Е. Лаврентьев; Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т. - Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2001. – 203 с.
122. Способ ремонта провисающих и размывших участков подводного трубопровода. Авт. свид. №1712729. Заявитель: ИПТЭР. Авторы: Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Аскарлов Р.М., Азметов Х.А., Забела К.А., Карамышев В.Г. Опубл. 15.02.92. Бюл. № 6.
123. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Пер. с англ. Под ред.Э. Ллойда, У. Ледермана, С.А. Айвазяна, Ю.Н. Тюрина. - М.: Финансы и статистика, 1990. – 526 с.
124. Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний М.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
125. Черняев В.Д., Гольдин Э.Р., Забела К.А. Строительство и эксплуатация подводных трубопроводов. Обзорн. информ. - М.: ВНИИОЭНГ, 1986. - Вып.11-48 с.
126. Шаммазов А.М., Мугаллимов Ф.М., Нефедова Н.Ф. Подводные переходы магистральных нефтепроводов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 237 с.
127. Широкова Г. В., Клемина Т. Н., Козырева Т. П. / Концепция жизненного цикла в современных организационных и управленческих

исследованиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия «Менеджмент». Сер. 8. Вып. 2, 2007, С. 3 – 31.

128. Штин И.В., Тарасов А.Г., Размыслов А.П., Лапшин Б.М. Система непрерывного контроля герметичности подводных переходов нефтепроводов // Трубопроводный транспорт нефти. - 2000. - Приложение № 1. – С.15.

129. Little I.D.C. Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus // Management Science, 1970. — v. 16. —N 8.

130. Marakas G. M. Decision support systems in the twenty-first century. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.

131. Power D. J. «What is a DSS?» // The On-Line Executive Journal for Data-Intensive Decision Support, 1997. — v.1. — N3.


132. Power D. J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. Americas Conference on Information Systems, Long Beach, California, 2000.

133. Power D.J. A Brief History of Decision Support System: version 2.8, May 31, 2003.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по подготовке и реализации проектов,  
ООО «Газпромнефть-Развитие»

 С.В. Картавый

### АКТ


внедрения научных результатов, полученных Сайфутдиновым А.И. при  
выполнении диссертационного исследования на тему  
**«Моделирование технического состояния подводного перехода нефтепровода  
и прогнозирование остаточного ресурса»**

Настоящим акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Сайфутдинова Аскара Ильдаровича «Моделирование технического состояния подводного перехода нефтепровода и прогнозирование остаточного ресурса», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно:

- алгоритм использования узконаправленных кластеров близких по характеристикам подводных переходов, позволяющий уточнить и удешевить решения, принимаемые на основе обработки больших объемов базы данных неструктурированной информации с применением цифровых технологий

использовался для разработки технических решений при реализации Крупного проекта «Газ Ямала» и содержатся в требованиях по мониторингу и эксплуатации производственного объекта. Разработанные в диссертационной работе технические подходы позволили оптимизировать периоды обследований и сократить эксплуатационные расходы. Данные решения будут тиражированы на последующие объекты.

Начальник департамента проектирования  
и интеграции предпроектных работ

 А.П. Смирнов

Руководитель программ по управлению  
процессами качества

 В.Р. Хакимов

*Начальник Управления  
по работе с персоналом*



*21.10.2021*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)**

ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450064. Тел.: (347) 242-03-70, факс: (347) 243-14-19. <http://www.ugntu.net>. E-mail: [info@ugntu.net](mailto:info@ugntu.net)  
ИНН 0277006179, ОГРН 1020203079016, ОКПО 02069450, КПП 027701001

11.04.2022 № 074-13/15

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

В диссертационный совет

Д.212.291.02



«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)

### СПРАВКА

Разработанное при участии соискателя Сайфутдинова Аскара Ильдаровича на кафедре «Транспорт и хранение нефти и газа» учебно-методическое пособие «Создание математических моделей технического состояния трубопроводов на основе принципов кластеризации», а также отдельные результаты исследований Сайфутдинова А. И. в части изложения примеров по разработке математических моделей технического состояния трубопроводов, используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при изучении дисциплин «Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли. Методы математической физики» по направлению подготовки магистров 21.04.01 «Нефтегазовое дело» и «Математическое моделирование процессов при транспорте и хранении углеводородов» по направлению подготовки бакалавров 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Проректор по учебной работе

профессор



И.Г. Ибрагимов