

На правах рукописи



Аралов Олег Васильевич

**МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОБОРУДОВАНИЯ
В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ
НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Специальность: 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Уфа - 2018 г.

Работа выполнена в центре оценки соответствия продукции, метрологии и автоматизации производственных процессов ООО «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта».

Научный консультант:

доктор технических наук
Лисин Юрий Викторович

Официальные оппоненты:

Чучкалов Михаил Владимирович

доктор технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Газпром трансгаз Уфа» / технический отдел,
начальник отдела

Иванов Валерий Иванович

доктор технических наук, профессор,
Закрытое акционерное общество «Научно-
исследовательский институт интроскопии
МНПО «Спектр» / главный научный сотрудник

Самигуллин Гафур Халафович

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет» / кафедра "Транспорт и
хранения нефти и газа", заведующий кафедрой

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет)
им. И.М. Губкина» (г. Москва).

Защита состоится 5 июля 2018 г. в 11:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <http://www.rusoil.net>.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проблема управления качеством оборудования, материалов и комплектующих в нефтегазовом комплексе (далее НГК) имеет свою историю и в силу ее очевидной актуальности, так или иначе решается нефтегазовыми компаниями на протяжении не одного десятка лет. Применительно к магистральному трубопроводному транспорту углеводородов эта задача также решается по своему – как в рамках директивно-предупредительной системы, так и путем создания корпоративных систем сертификации продукции. Проанализировав различные системы управления качеством в НГК в целом и, магистральном трубопроводном транспорте, в частности, автор пришел к выводу, что наиболее структурированная и эффективная система создана и функционирует в крупнейшей трубопроводной корпорации страны ПАО «Транснефть» (далее ПАО «ТН»). Эта система создана и развивается в рамках отраслевой системы оценки соответствия оборудования, применяемого в Компании. Ядром этой системы сертификации является информационно-аналитическая база – Реестр Основных Видов продукции.

Помимо классических процедур сертификации, система оценки соответствия включает в себя целый комплекс научно-методических процедур, таких как: разработка нормативной базы, определяющей технические требования к оборудованию, а также математический аппарат, позволяющий решать задачи прогнозирования отказов оборудования, нормирования режимов его эксплуатации и определения периодичности проведения его испытаний и ремонтов.

При этом нормативная документация вида: общие и специальные технические требования, разрабатывается на основе результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (далее НИОКР), реализуемых Компанией, что позволяет сформулировать научно-обоснованные параметры и характеристики оборудования.

В настоящее время, ПАО «Транснефть» регулирует качественные показатели эксплуатируемых технических систем специальным комплексом организационно-технических мероприятий, включающих: испытания оборудования, инспекции производства на заводах-изготовителях, а также экспертизу технической документации производителей оборудования.

Непрерывная реализация процедур управления надежностью позволяет снизить риск применения на производственных объектах оборудования, несоответствующего реальным условиям эксплуатации, вследствие чего повышается общая надежность трубопроводных систем. В рамках диссертационных исследований решается еще одна важная научная задача: управление жизненным циклом оборудования на всех интервалах его наработки. Основу управления в данном случае составляет математическое прогнозирование в области изменения состояния сложных технических систем (далее СТС), результатом которого являются предложения по введению новых, или модернизации существующих требований к техническим, производственным и эксплуатационным условиям. При этом разработанные и внедренные математические модели и методики позволяют научно обосновывать предъявляемые к оборудованию требования по качеству производства и условиям эксплуатации, что является неотъемлемым свойством современной системы оценки соответствия.

В данной работе под сложной технической системой понимается оборудование нефтеперекачивающих станций (в соответствии с определением сложной технической системы согласно ГОСТ 22.2.04-2012). В качестве анализируемого вида потока отказов принимается нестационарный пуассоновский поток, под его базовым распределением понимается двухпараметрическое распределение Вейбулла, удовлетворяющее условию объективности использования для большинства СТС, эксплуатируемых компаниями магистрального трубопроводного транспорта углеводородов.

При этом двухпараметричность потока определяется установленной областью исследования, характеризующейся полным жизненным циклом оборудования, что соответствует положению распределения Вейбулла на полуоси от нуля до бесконечности по наработке оборудования (нулевое значение характеризует ввод СТС в эксплуатацию).

Управление качеством СТС с использованием механизма оценки соответствия, дифференцируется по видам операций, исходя из реальной наработки оборудования на текущем этапе эксплуатации.

Так, на этапе приработки оборудования в качестве инструмента по регулированию качества СТС используется экспертиза технической документации, первичная инспекция производства, а также приемо-сдаточные и приемочные испытания. При этом технические требования и объем работ формируется в соответствии с информацией, получаемой в процессе реализации математического подхода к анализу и прогнозированию состояния СТС. В результате этого обеспечивается взаимосвязь между входными требованиями к оборудованию и реальным условиям эксплуатации. Также управление качеством СТС на упомянутом этапе осуществляется в ходе регулирования действующих технических требований, формирование которых находится в прямой зависимости от результатов расчетов, получаемых с помощью математического аппарата по прогнозированию технического состояния оборудования, разработанного в диссертационной работе.

На этапе устойчивой эксплуатации реализуются: плановая, повторная и внеплановая инспекция производства, а также периодические испытания оборудования, объем и периодичность которых устанавливается в соответствии с разработанными методиками количественного и качественного прогнозирования состояния СТС. При этом в качестве основного информационного ресурса используется база данных по оценке качества оборудования, являющаяся главным инструментом мониторинга показателей надежности на всех интервалах жизненного цикла.

В рамках данной работы рассмотрены три наиболее характерных для оборудования стадии жизненного цикла: производство, этап приработки, этап устойчивой эксплуатации.

Учитывая изложенное, в данной работе предлагаются принципиально новые методы по количественной и качественной оценке вероятности появления отказов СТС. Основой разрабатываемого методологического аппарата является идея о необходимости диагностирования дефектов скрытого заводского характера, возникающих при производстве оборудования с последующим анализом их развития в процессе эксплуатации. Статистические данные за последние 15 лет, имеющиеся в распоряжении Компании позволили разработать вероятностно-статистические модели, которые в общем виде способствуют реализации математического вероятностного подхода при оценке надежности производства

оборудования. Результаты, полученные в ходе применения предлагаемых моделей, позволяют производить дальнейшие прогнозные оценки по определению вероятности появления отказов на всех этапах жизненного цикла оборудования в процессе его эксплуатации.

В рамках диссертационных исследований решена **важная народно-хозяйственная** проблема, заключающаяся в необходимости разработки системы регулирования условий производства и эксплуатации сложных технических систем по принципу обеспечения их организационно-технической и научно-методической взаимосвязи. Данная форма организации позволяет обеспечить большую системную надежность оборудования, эксплуатируемого на опасных производственных объектах, на всех этапах его жизненного цикла, что уменьшит вероятность появления внештатных ситуаций, связанных с риском нанесения ущерба обслуживающему персоналу, окружающей среде и эксплуатируемому оборудованию.

Основные положения проводимых исследований рассматривались в трудах российских и зарубежных ученых: Г.Г. Азгальдов, И.В. Апполонов, Ю.П. Астахов, В.Ф. Алешин, И.Р. Байков, Л.И. Быков, А.К. Гяллямов, В.И. Иванов, П.А. Иващенко, В.А. Исаченко, А.Ю. Колобов, Б.С. Митин, Ю.А. Петров, В.П. Приходько, Э.П. Райхман, Г.Х. Самигуллин, Л.И. Святкин, Н.С. Стрелецкий, В.А. Трофимов, В.Д. Черняев, К.В. Черняев, М.В. Чучкалов, А.М. Шаммазов, А.С. Ширшиков, Николас де Брейн, Маркус дю Сутуа, Жан Бургейн. Наряду с перечисленными источниками, автором в рамках диссертационных исследований проанализированы и применены материалы, опубликованные в энциклопедических справочниках «Надежность и эффективность в технике» под редакцией академиков В.С. Авдеевского, В.И. Кузнецова, В.А. Мельникова, В.П. Мишина, В.Ф. Уткина, К.В. Фролова, Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко и др.

Проблема диссертационных исследований – отсутствие завершеного методологического аппарата, включающего в себя комплекс методик и математических моделей, и позволяющего управлять качеством оборудования на основании обширных статистических данных о его возможных состояниях в процессе эксплуатации. Основное направление решения выявленной проблемы состоит в разработке базовых методов, позволяющих использовать эксплуатационную информацию о возможных состояниях СТС с привязкой ко всем этапам жизненного цикла оборудования.

Цель и задачи работы

Цель работы – создание научно-обоснованных способов управления качеством оборудования с использованием статистическо-вероятностного аппарата, позволяющего осуществлять качественное и количественное прогнозирование состояния СТС на различных этапах его производства и эксплуатации.

При этом под качественным прогнозированием понимается оценка технического состояния СТС, осуществляемая в результате применения комплекса математических моделей, разработанных с использованием исходных данных, представленных в виде эксплуатационных характеристик оборудования, отнесенных к моменту начала анализа, а также эксплуатационных характеристик оборудования, соответствующих ненормативным режимам эксплуатации, предшествующим появлению отдельных видов отказов.

Под количественным прогнозированием понимается оценка технического состояния СТС, осуществляемая в результате применения комплекса математических моделей, разработанных с использованием исходных данных, представленных в виде временной выборки статистической информации о количестве отказов СТС, причинах их появления, а также времени появления, отнесенного к моменту времени ввода оборудования в эксплуатацию.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ основных фондов компаний трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. Определение СТС с максимально репрезентативной выборкой статистической информации о возможных состояниях в процессе эксплуатации и производства для дальнейшей разработки комплекса методик управления качеством и надежностью оборудования.

2. Обоснование использования научных исследований по прогнозированию технического состояния оборудования как основного инструмента управления его качеством, в том числе обоснование возможности применения отдельных методов математического анализа для функционального формирования методики управления качеством оборудования насосных станций, позволяющей усовершенствовать методы его эксплуатации.

3. Разработка методик управления качеством и надежностью оборудования нефтеперекачивающих станций на этапе его производства и эксплуатации, с использованием методов и подходов, основанных на определении основных показателей надежности и характеристик потока отказов, а также факторов и вероятности появления заводского брака.

4. Интеграция характеристик оборудования на различных режимах его эксплуатации и устойчивой по принимаемой к анализу временной выборке статистической информации о количестве отказов СТС, их причинах и времени появления (отнесенного к моменту ввода оборудования в эксплуатацию), как исходных данных к разрабатываемым методикам управления надежностью с целью прогнозирования остаточного ресурса оборудования в процессе его эксплуатации.

5. Разработка математической модели по конкретизации жизненного цикла оборудования нефтеперекачивающих станций с использованием в качестве выходных данных: времени наступления отказов и периодичности проведения работ по поддержанию работоспособного состояния СТС.

6. Формирование методологии управления качеством оборудования нефтеперекачивающих станций, на всех интервалах его жизненного цикла с использованием комплекса научно-исследовательских и организационно-технических мероприятий для обеспечения системной надежности нефтепроводных систем.

Предмет исследования – параметры системной надежности оборудования нефтеперекачивающих станций, характеризующие качество его производства и условия эксплуатации.

Объект исследования – оборудование нефтеперекачивающих станций компаний магистрального трубопроводного транспорта.

Научная новизна

1. Сформулирована и аналитически решена проблема управления качеством оборудования нефтеперекачивающих станций, основывающаяся на базовых принципах прогнозирования состояния сложных технических систем, выраженных в качественной и количественной форме, в соответствии с применяемыми методами математического моделирования.

2. Существенно усовершенствованы методики по управлению качеством и надежностью оборудования нефтеперекачивающих станций, основанные на применении статистической информации о возможных состояниях оборудования, условиях его производства, особенностях эксплуатации и технического обслуживания, позволяющие осуществлять регулирование технической системы, основываясь на показателях надежности и параметрах потока отказов оборудования.

3. Введено и обосновано использование критерия оценки оптимальной периодичности проведения ремонтных работ оборудования нефтеперекачивающих станций, позволяющего повысить системную надежность СТС на этапах приработки при сохранении уровня финансовых затрат на их реализацию.

4. Разработаны и обоснованы новые критерии по определению наработки на отказ СТС, соответствующей ее переходу из зоны приработки в зону устойчивой эксплуатации, представленные в виде вероятностно-статистических математических моделей, основанных на функциях базовых показателей надежности.

Теоретическая значимость работы

1. Оценено влияние отклонений отдельных эксплуатационных характеристик нефтеперекачивающих агрегатов от номинальных значений на общую надежность системы.

2. Определена оптимальная периодичность проведения ремонтных работ магистральных насосов типа НМ и синхронных электродвигателей, эксплуатируемых на нефтеперекачивающих станциях, для значений наработок, характерных для этапов приработки.

3. Предложен метод по определению вероятных состояний оборудования нефтеперекачивающих станций с использованием статистической информации об его рабочих параметрах при наиболее характерных режимах эксплуатации.

4. Разработан системный подход по определению условий возникновения наиболее характерных видов отказов оборудования нефтеперекачивающих станций и прогнозированию количества отказов, а также плотности их распределения по отдельным интервалам эксплуатации оборудования.

5. Разработана математическая модель по определению производственных факторов, влияющих на появление заводского брака СТС, а также определению вероятности его появления в текущих условиях производства.

Практическая значимость работы

1. На основании полученных результатов были сформированы следующие основополагающие программные документы, определяющие перспективное научно-техническое развитие ПАО «Транснефть»:

– план научно-исследовательских (далее НИР) и опытно-конструкторских работ (далее ОКР), включающий 8 НИР и 4 ОКР;

- программа совершенствования нормативной базы, включающая предложения по модернизации ряда общих технических требований (далее ОТТ) к качеству оборудования;

- федеральная программа разработки межгосударственных и национальных стандартов на основе отраслевых ОТТ, подтвердивших свою эффективность на практике.

2. В результате внедрения разработанной методологии была увеличена комплексная надежность трубопроводных систем, характеризующаяся:

- повышением абсолютного значения коэффициента готовности оборудования до 0,96, с единовременным уменьшением вариативного разброса его значений по общей наработке до диапазона [0,92; 0,96];

- повышением абсолютного значения коэффициента технического использования оборудования до 0,98, с единовременным уменьшением вариативного разброса его значений по общей наработке до диапазона [0,92; 0,98];

- повышением абсолютного значения коэффициента сохранения эффективности оборудования до 0,94, с единовременным уменьшением вариативного разброса его значений по общей наработке до диапазона [0,92; 0,94];

- уменьшением среднего времени восстановления оборудования до трех суток, с единовременным уменьшением вариативного разброса его значений до диапазона [3; 8] суток;

- уменьшением среднего индекса аварийности оборудования по отдельным производственным объектам до 0,0005 1/час;

- повышением среднего значения эффективности использования оборудования по среднему значению для отдельных производственных объектов до 6,5 %;

- уменьшением доли оборудования с заводскими дефектами до 3%.

3. Применение разработанной методологии позволит сократить финансовые потери от вынужденного простоя оборудования нефтеперекачивающих станций, в том числе в результате:

- сокращения затрат электроэнергии на пуск насосных агрегатов, вызванных их внеплановыми остановками в количестве 34,83 млн. руб. /год на 900 эксплуатируемых единиц;

- сокращения финансовых потерь на восстановление работоспособного состояния магистральных насосов в количестве 834, 39 млн. руб./год на 900 эксплуатируемых единиц.

Методы исследования

В процессе исследований применялись методы математического моделирования и вероятностно-статистического анализа, в том числе: линейное и динамическое программирование, корреляционно-регрессионный анализ, ковариационный анализ, метод геометрической вероятности, стохастический факторный анализ, а также основные положения теории случайных процессов (Марковские цепи).

Основные защищаемые положения

1. Основы методического управления качеством производства оборудования с использованием базовых принципов линейного и динамического программирования и корреляционно-регрессионного анализа для определения полной вероятности заводского брака и факторов, влияющих на его появление.

2. Методика качественного прогнозирования отказов СТС с использованием основных положений корреляционного, ковариационного и стохастического факторного анализа для определения коэффициента готовности СТС к эксплуатации, вероятности безотказной работы и ожидаемого времени появления отказа.

3. Базовые положения методики количественного прогнозирования отказов СТС с использованием основных положений теории Марковских процессов, математической статистики и метода экономического дисконтирования для определения интенсивности отказов СТС, плотности распределения вероятности их появления, и конкретизации видов возможных отказов.

4. Результаты аналитического решения задачи управления качеством оборудования нефтеперекачивающих станций на всех интервалах жизненного цикла, представленные в виде теоретической методологии, с применением инструментов регулирования в виде проведения экспертизы технической документации; инспекций производства заводов изготовителей; квалификационных, приемосдаточных и приемочных испытаний оборудования, а также технадзора на заводах-изготовителях оборудования.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием в работе актуальных исходных данных в области инспектирования, контроля качества, эксплуатации оборудования и производственных объектов, накопленных ведущим оператором трубопроводных систем Российской Федерации ПАО «Транснефть». Все научные положения и выводы обоснованы использованием фундаментальных методов математического анализа и моделирования, в том числе как инструмента для уточнения полученных результатов и оценки степени их значимости для принятой области исследования, что обеспечивает объективность применения разработанной методологии.

Основные положения диссертационной работы докладывались на 8 международных научно-практических конференциях («Нефтегазстандарт-2015» (г. Астрахань, 2015 г.), «Импортозаместимость в нефтегазовой отрасли» (г. Москва, 2015 г.), «Трубопроводный транспорт» (г. Уфа, 2016 и 2017 гг.), «Международной научно-технической конференции А.Х. Мирзаджанзаде» (г. Уфа, 2016 г.), «Закупки и снабжение в Нефтегазовом секторе» (г. Москва, 2016 г.) и др.). Теоретические разработки и практические рекомендации автора: отражены в 53 отчетах о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, внедрены на 8 заводах-изготовителях оборудования и материалов (Завод «Транснефтемаш» АО «Транснефть-Верхняя Волга», НПП «Уралэлектра», ООО «Системы нефть и газ», ООО «ЗЛКМ «Снежинка» и др.) и в 2 организациях эксплуатирующих магистральные нефтепроводы ПАО «Транснефть» (АО «Транснефть-Урал», АО «Транснефть-Прикамье»).

Публикации по результатам исследований

По теме диссертации опубликовано 64 работы, в том числе монография, 21 статья в журналах, рекомендованных ВАК, и 5 свидетельств о государственной регистрации интеллектуальных прав.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и основных выводов; содержит 479 страниц машинописного текста, включая 40 таблиц, 96 рисунка, 6 приложений и библиографический список из 322 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель работы и определены решаемые задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований.

В **первой главе** проведен анализ существующих подходов к управлению качеством оборудования в России и за рубежом. По результатам анализа отмечено, что с точки зрения системного подхода, одним из основных инструментов регулирования качества оборудования, является применение систем оценки соответствия. При этом следует отметить, что зарубежные и отечественные системы имеют ряд существенных отличий, из которых основное заключается в наличии единого алгоритма формирования принципов оценки качества продукции для мировых систем оценки соответствия, в то время как в Российской Федерации, ввиду большого количества малых систем сертификации (практически не поднадзорных государственному аттестационному органу), данный алгоритм отсутствует. По результатам анализа, также было отмечено, что для управления качеством оборудования, эксплуатируемого компаниями трубопроводного транспорта, существующие системы оценки соответствия (как отечественные, так и зарубежные) имеют ряд существенных недостатков, наиболее значительным из которых является обширная юрисдикция инспектирующих органов относительно количества подконтрольных областей промышленности. Именно обширная сфера влияния, приводит к ненадлежащему контролю качества оборудования, что является недопустимым для компаний, эксплуатирующих опасные производственные объекты.

В связи с вышесказанным, было установлено, что для управления качеством оборудования в заданной области исследования, рациональным является применение отраслевых систем оценки соответствия. В качестве базовой, была принята система, используемая ПАО «Транснефть», основанная на применении научно-методических и организационно-технических работ по управлению качеством оборудования. При этом была сформирована проблема диссертационных исследований, заключающаяся в отсутствии способа взаимосвязи научно-исследовательского блока, применяемого в качестве совокупности методов регулирования, и организационно-технического, применяемого в качестве инструмента регулирования.

Также в рамках первой главы был произведен анализ методов оценки технического состояния оборудования. Было отмечено, что некоторые технические задачи, решаемые в рамках данной диссертационной работы, были рассмотрены в следующих областях исследований:

- надежность технических систем;
- надежность оборудования, эксплуатируемого в магистральном трубопроводном транспорте;
- разработка, модернизация и применение систем оценок соответствия продукции;

– применение вероятностно-статистических методов анализа к прогнозированию отказов оборудования.

Во **второй главе** была сформулирована постановка задачи исследования, а также основанная на ней декомпозиция задачи. Постановка задачи подразумевает создание отдельных методик прогнозирования состояния СТС, обеспечивающих необходимую степень использования статистической информации по видам и причинам отказов и инцидентов оборудования. При этом в качестве базовых направлений исследований определяются: регулирование процессов производства оборудования и регулирование процессов его эксплуатации. Регулирование процессов производства оборудования, обеспечивается в результате установления основных причин появления заводского брака и определения его полной вероятности. Регулирование процессов эксплуатации подразумевает исследования возможных состояний СТС, направленных на выявление несоответствий оборудования, заложенных на этапе производства, а также разработку численных методов анализа и прогнозирования его технического состояния. Конечным результатом является методология управления качеством оборудования, осуществляемая с использованием сформированного плана реализации организационно-технических и исследовательских работ.

Математическая постановка задачи, включает в себя комплекс разработанных зависимостей, определяющих основные направления проводимых исследований и формирующих необходимую область ограничений. Кроме того, математическая постановка задачи описывает методы решений поставленной проблемы исследований, а также используемый математический инструментарий, в частности отдельные методы математического анализа: корреляционно-регрессионный анализ, ковариационный анализ, метод геометрической вероятности, теорию Марковских цепей, метод экономического дисконтирования, методы линейного и динамического программирования и ряд прочих.

Также математическая постановка задачи включает восемь основных функционалов, заключающихся в следующих положениях:

– общий уровень надёжности СТС на всех этапах жизненного цикла, являющийся функцией уровня надёжности выпускаемого и эксплуатируемого оборудования, а также их стоимостных показателей, должен удовлетворять условию максимума по значениям применяемых качественных компонент для заданных условий исследований;

– вероятность появления заводского брака при производстве СТС не должен превышать необходимый уровень надёжности выпускаемого оборудования (для любого возможного скрытого дефекта заводского характера). Уровень несоответствия характеристик СТС заданным эксплуатационным условиям не должен превышать требуемый уровень надёжности эксплуатируемого оборудования (для любого возможного несоответствия характеристик СТС);

– пары эксплуатационных характеристик СТС и сформированное при них корреляционное множество возможных состояний должно принадлежать вероятностному пространству отказов оборудования в процессе его эксплуатации. При этом вероятностное пространство эксплуатационных отказов СТС является элементом функции уровня надёжности эксплуатируемого оборудования;

– вероятность появления заводского брака при производстве СТС должна принадлежать сформированному корреляционному множеству ее возможных

состояний и являться элементом функции уровня надёжности выпускаемого оборудования;

- прогнозное количество оборудования с заводским браком, определяемое вероятностью появления заводского брака, должно отображаться периодичностью проведения ТОР СТС, их содержанием и необходимой степенью загрузки (использования) оборудования (и наоборот);

- вероятность появления заводского брака и прогнозное количество оборудования с заводским браком должны нормировать безотказное время эксплуатации СТС;

- вероятностное пространство отказов и прогнозное количество отказавшего оборудования по причине эксплуатационного характера включают в себя вероятность появления заводского брака и прогнозное количество оборудования с заводским браком. При этом безотказное время эксплуатации СТС принадлежит множеству времени появления i -х отказов СТС по причине заводского характера и времени появления i -х отказов СТС по причине эксплуатационного характера;

- текущая вероятность отказа СТС и текущий коэффициент готовности СТС к работе должны определять периодичность проведения ТОР СТС, содержание ТОР СТС и степень загрузки (использования) оборудования.

Декомпозиция представляет комплекс сформированных к исследованию задач и методов их решения, представленных в виде отдельных блок схем и характеризующихся выраженным направлением решения (рисунок 1).

В третьей главе приведено обоснование возможности математически прогнозировать отказы оборудования, в результате доказательства принадлежности потока отказов к Марковским процессам.

Для определения оптимальных исходных данных для разработки методологии был проведен анализ фондов компаний трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, с целью установления видов оборудования, обладающих наибольшей возможной выборкой статистической информации об их техническом состоянии. К анализу было принято оборудования резервуарного парка, магистральных и подпорных насосных агрегатов и узлов учета нефти и нефтепродуктов. В результате было установлено, что наибольшей возможной выборкой обладают магистральные насосные агрегаты.

В качестве базового оборудования нефтеперекачивающего агрегата, оснащенного магистральным насосом (далее НПА) были приняты: синхронный электродвигатель СДП-10-8000-2УХЛ-4 БВУ ООО магистральный насос НМ 7000-210, гидравлическая муфта и аппарат воздушного охлаждения антифризом.

Далее были разработаны основные положения качественного прогнозирования отказов СТС, заключающиеся в следующем. Качественная оценка момента и условий возникновения отказа имеет основополагающую роль в обеспечении надежности оборудования и отдельных технологических процессов на производстве. При этом под качественной оценкой понимается осуществление динамического мониторинга изменения состояния системы, для определения ожидаемого времени появления отказа, его вероятности, а также текущего коэффициента готовности оборудования к работе.

В основу методики качественного прогнозирования положено допущение, что аварийное состояние оборудования по какому – либо виду отказа, характеризуется комбинацией значений определённых параметров x_i, y_i, \dots, z_i динамически

изменяющихся во времени. В момент времени, соответствующий нормальному режиму эксплуатации СТС, значения данных параметров имеют определённый диапазон вариации. В случае начала развития какого – либо дефекта, один или несколько параметров из общей комбинации начинают отклоняться от значения своего математического ожидания $M(x_i, y_i, \dots, z_i)$ на определённую величину, и выходят по своему абсолютному значению за условный допустимый диапазон вариации.

Для отслеживания динамики изменения значений эксплуатационных характеристик оборудования в процессе его эксплуатации с целью определения момента перехода системы в отказное состояние использовался корреляционно-регрессионный анализ (далее КРА), аргументами которого, являются тренды упомянутых эксплуатационных характеристик, фиксируемые в моменты времени соответствующие и предшествующие отказу СТС.

Результатом КРА является установление комбинаций принимаемых к расчёту параметров, совместное отклонение которых влияют на переход системы в состояние, предшествующее определённому виду отказа. В качестве модели расчета использовалась двумерная модель декартовой системы координат, узловые точки которой характеризуют степени связи соответствующих эксплуатационных характеристик СТС по коэффициентам корреляции и ковариации, приведенные к нормальному и аварийному режиму эксплуатации оборудования.

Использование в качестве математического инструмента для мониторинга технического состояния системы зависимости ковариации двух параметров от их корреляции, позволяет контролировать как абсолютные средние значения комбинаций эксплуатационных характеристик на определённом интервале времени, так и удельную долю разброса данных значений по всему вариационному ряду случайных величин, характеризующих значения вышеупомянутых эксплуатационных параметров.

В случае развития какого-либо отказа системы, корреляционно-ковариационные связи, устойчивые по своим значениям начинают изменяться (изменяются отклонения коэффициентов парной корреляции) с определённого момента времени вплоть до наступления отказа. В связи с этим отслеживание динамики изменения связей между элементами оборудования может отображать процессы развития дефектов, в конечном счете, приводящих к отказам системы.

В целом, основной моделью для проведения качественного прогнозирования отказов оборудования является корреляционно-ковариационное вероятностное поле отказов СТС (графическая интерпретация данной модели представлена на рисунке 2).

Из рисунка 2 следует, что концентрация точек, обозначенное красной криволинейной границей, представляет собой поле условного отказа, в то время как скопление, обозначенное красным контуром, характеризует зону эксплуатации системы на номинальных режимах. Таким образом, для появления отказа оборудования условного типа, необходимо, чтобы все соответствующие точки из области нормальной эксплуатации, перешли в зону неустойчивой эксплуатации. То есть, показательная точка с координатами cov_{xy}^1 и r_{xy}^1 должна переместиться в обозначенную условную зону, таким образом, чтобы ее новые координаты были близки по своим значениям с числами cov_{xy}^2 и r_{xy}^2 .

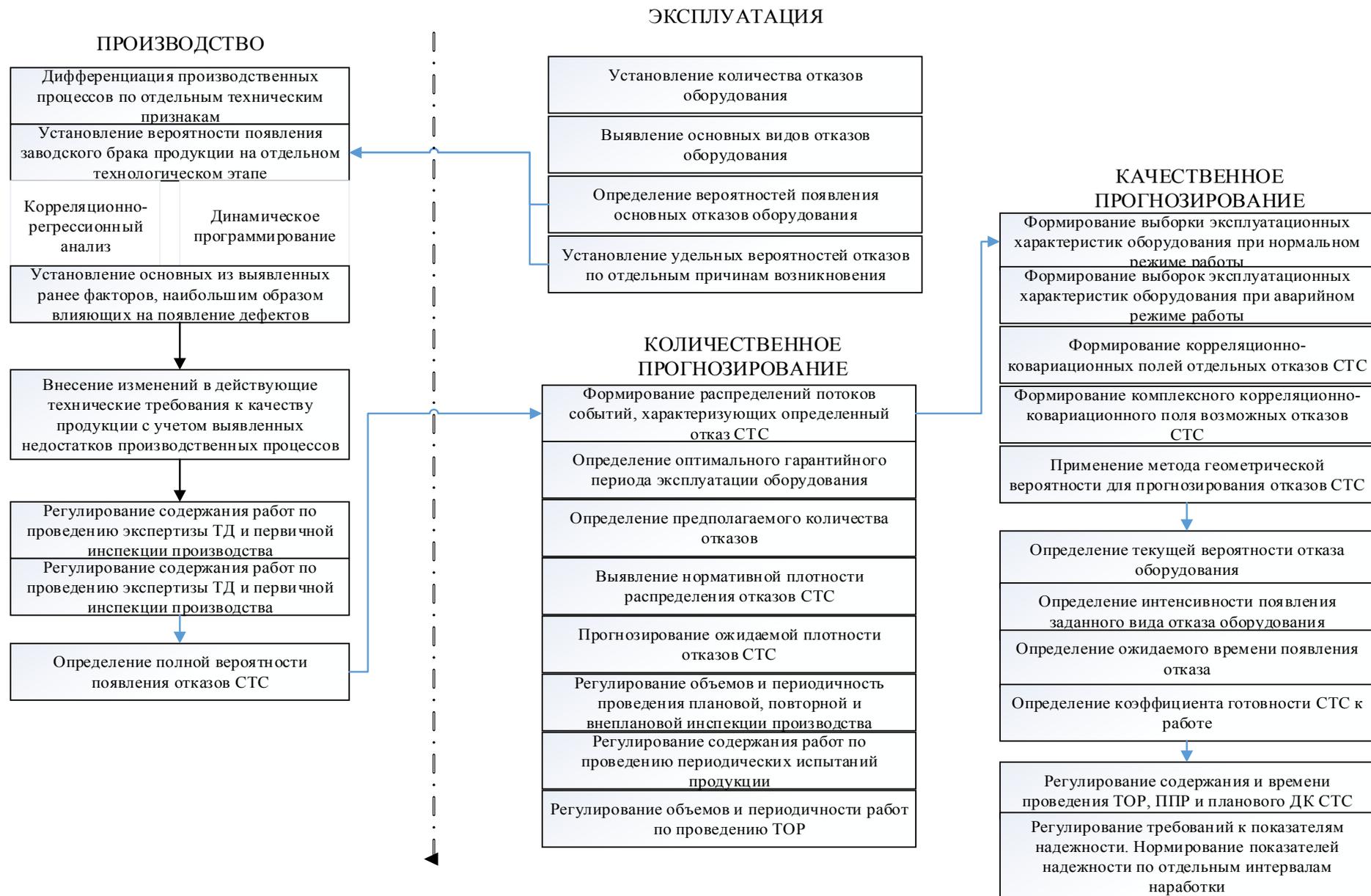


Рисунок 1 – Декомпозиция задачи по управлению качеством оборудования с использованием механизма оценки соответствия

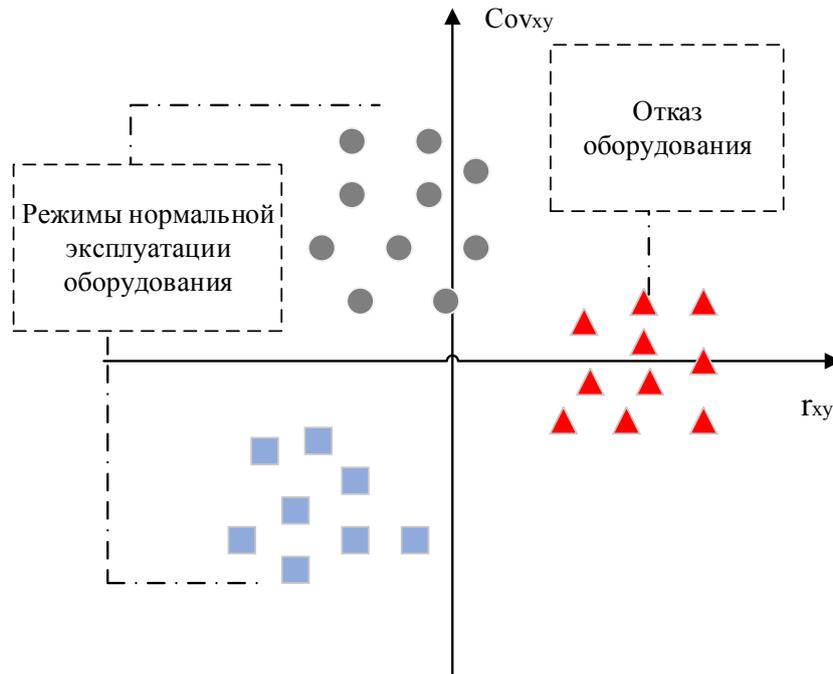


Рисунок 2 – Корреляционное поле для единичного отказа

В данном случае путь, который необходимо пройти точке, будет рассматриваться как непрерывный, произвольно перемещающийся в пространстве отрезок (данный частный случай неоднократно рассматривался в прикладных задачах геометрической вероятности), характеризующий текущую вероятность наступления условного отказа. Таким образом, постановка задачи по качественному определению ожидания условного отказа, в абстрактной (математической) интерпретации принимает вид: располагая исходными (безаварийными) и конечными (аварийными) координатами соответствующих точек, а также границами зон отказов, определить геометрическую вероятность наступления условного отказа. В тоже время, данная задача может иметь вторую форму постановки с привязкой к вещественным (материальным величинам): располагая исходными координатами окрестностей концов рассматриваемого отрезка, определить вероятность того, что конец отрезка, при изменении его длины по значению максимально близкому к 0, окажется в окрестностях точки с координатами cov_{xy}^2 и r_{xy}^2 при этом, не выйдя за границы условного поля отказов.

Решение сформулированной задачи предлагается реализовать через граничные условия благоприятного события. В данном случае рассматриваются два частных случая выполнения благоприятного условия:

1. Попадание конца отрезка в указанный сектор без его линейного перемещения относительно первоначального положения, но с изменением радиуса поворота относительно базовой точки с координатами cov_{xy}^1 и r_{xy}^1 ;
2. Попадание конца отрезка в указанный сектор без изменения радиуса поворота относительно базовой точки, но при наличии линейного перемещения отрезка относительно первоначального положения.

В общем виде, постановка задачи в графической интерпретации, приведена на рисунке 3.

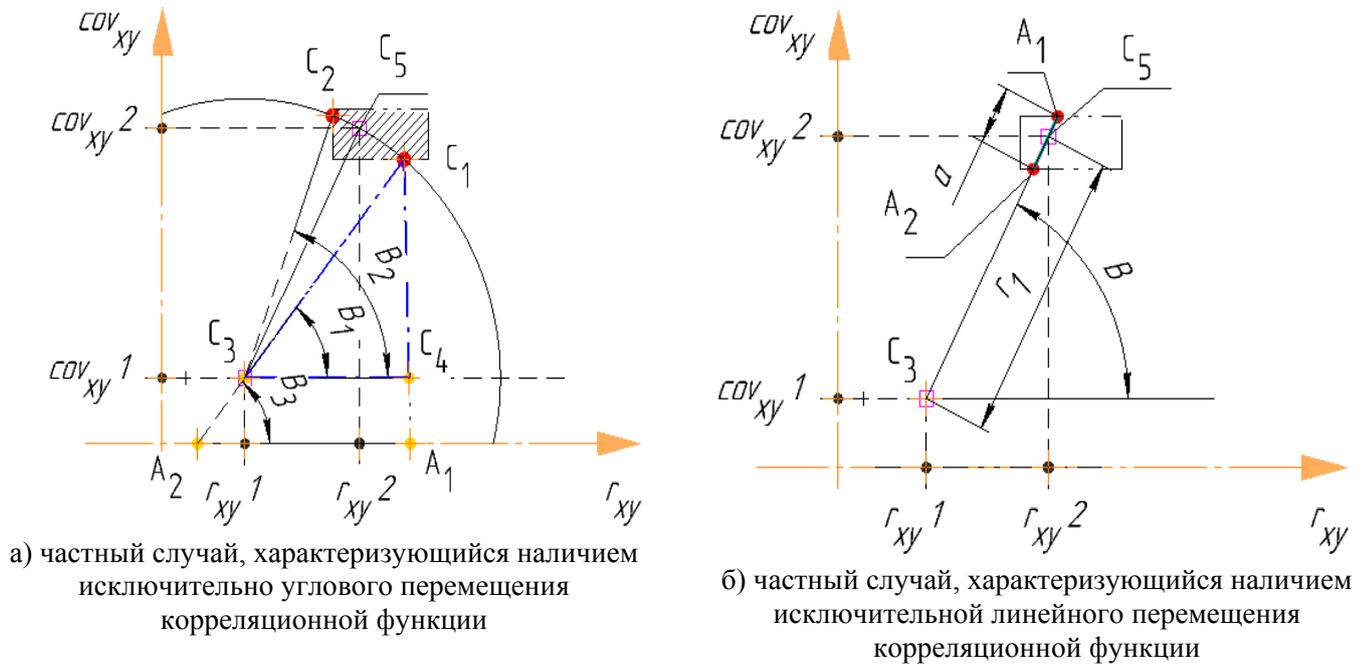


Рисунок 3 – Постановка задачи по определению геометрической вероятности появления отказа оборудования

Исходная зависимость для определения геометрической вероятности отказа, из рисунка 3, описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(M, N) = \frac{a}{r_1} \cdot \frac{B}{360} \\ P(M, N) = \frac{a}{r_1 - r_2} \cdot \frac{B}{360} \\ P(M, N) = \frac{a}{\sqrt{(r_{xy}^2 - r_{xy}^1)^2 + (\text{cov}_{xy}^2 - \text{cov}_{xy}^1)^2} - \sqrt{(r_{xy}' - r_{xy}^1)^2 + (\text{cov}_{xy}' - \text{cov}_{xy}^1)^2}} \cdot \frac{B}{360} \end{array} \right. \quad (1)$$

где: a – длина участка, характеризующая протяженность поля отказов, мм; r_1 – длина участка, характеризующая общую вариативность возможность исходов наблюдения, мм; B – угловой коэффициент, характеризующий нелинейность решения сформированной задачи.

С учетом некоторых преобразований, дифференциации конечного уравнения системы (1) по линейным и угловым видам перемещения, оптимизации целевой функции исследования вероятностной области появления отказа, распределению конечных сценариев исхода миграций объектов исследования по рассматриваемой декартовой ковариационно-корреляционной модели, геометрическая вероятность появления отказа оборудования определяется из системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(M, N) = \frac{a_i}{R_i} \cdot \frac{S_i}{R_1} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_i} \\ P(M, N) = \frac{a_i}{\sqrt{(cov_{xy}^k - cov_{xy}^j)^2 + (r_{xy}^k - r_{xy}^j)^2}} \cdot \frac{\sqrt{(cov_{xy}^j - cov_{xy}^h)^2 + (r_{xy}^j - r_{xy}^h)^2}}{\sqrt{(cov_{xy}^k - cov_{xy}^h)^2 + (r_{xy}^k - r_{xy}^h)^2}} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_i} \\ P(M, N)_{total} = \frac{P(M, N)_i}{n} \end{array} \right. \quad (2)$$

где cov_{xy}^k, r_{xy}^k – координаты по ковариации и корреляции соответствующих степеней связи пары эксплуатационных характеристик, являющихся показателями аварийного состояния оборудования (находятся в поле отказов);

cov_{xy}^h, r_{xy}^h – координаты по ковариации и корреляции соответствующих степеней связи пары эксплуатационных характеристик, являющихся показателями безаварийного состояния оборудования при номинальном режиме его эксплуатации;

cov_{xy}^i, r_{xy}^i – координаты по ковариации и корреляции соответствующих степеней связи пары эксплуатационных характеристик в определённом промежуточном i -м положении, задающем переориентацию степеней связи из области безаварийного режима работы оборудования в направлении поля отказа;

$P(M, N)_i$ – вероятность наступления отказа для отдельной точки, задающей соответствующую степень связи по ковариации и корреляции пары эксплуатационных характеристик, в i -й момент времени;

n – количество точек, участвующих в анализе.

Конечным результатом исследований в области качественного прогнозирования отказов, является возможность проведения оперативной оценки готовности оборудования к работе по следующим критериям: вероятность отказа и ожидаемое время появления отказа. В ходе оперативной оценки готовности используются текущие эксплуатационные характеристики СТС, выбранные в качестве значимых для проводимых исследований. В данном случае текущая вероятность отказа, определяемая в соответствии с системой уравнений (2), позволяет установить ожидаемое время появления отказа, в соответствии с нижеприведенной зависимостью временной информативности потока событий:

$$\tau = \frac{\ln[P(M, N)_{total}]}{-\lambda_i}, \quad (3)$$

где λ – средняя интенсивность появления отказов i -го вида, 1/час.

В тоже время, в качестве дополнительного критерия оценки технического состояния оборудования в соответствии с положениями разрабатываемой методики используется оперативный коэффициент готовности:

$$K_g = \frac{\sum P(M, N)_{total}^i \cdot \tau_i}{\sum P(M, N)_{total}^i \cdot \tau_i + \sum P(M, N)_{total}^i \cdot \tau_{восст i}} \quad (4)$$

где $\tau_{восст i}$ – время восстановления системы по i -му виду отказа.

Основным направлением практического применения методики качественного прогнозирования отказов оборудования становится выделение граничных условий ее функционирования. При этом решается обратная задача: определение соответствующих аргументов функции парной корреляции при известных значениях ее коэффициентов. Располагая данными по необходимому, для достижения рассматриваемых отказов системы, значениям ковариационно-корреляционных пар, становится возможным установить граничные значения отдельных эксплуатационных характеристик.

В данном случае, в качестве истинного для определения граничных условий, принимается значение коэффициента парной корреляции (исходная схема для разработки математической модели представлена на рисунке 4).

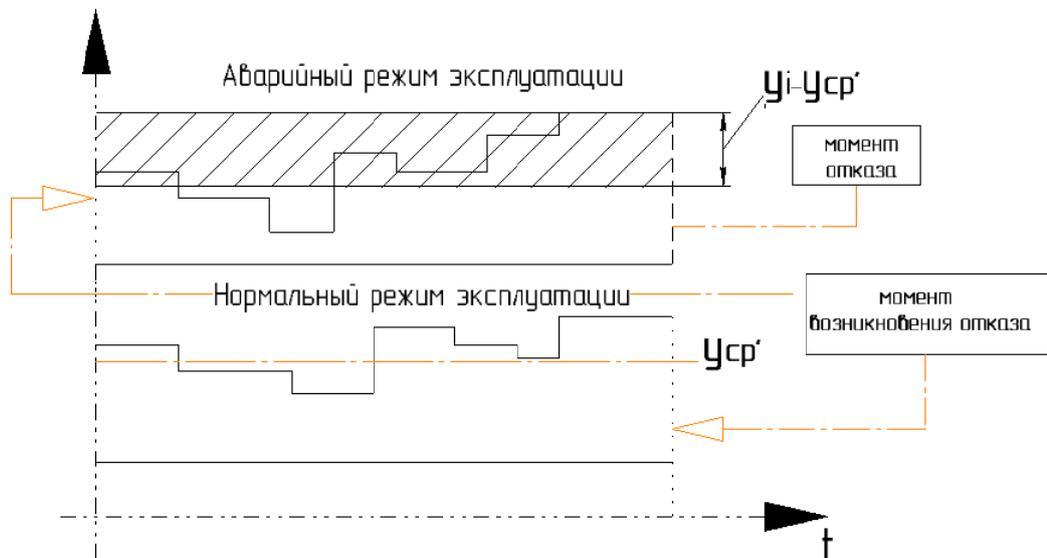


Рисунок 4 – Установление граничных условий функционирования методики качественного прогнозирования отказов оборудования

Базовой расчетной зависимостью является уравнение парной корреляции, в результате некоторых преобразований которого выражаться искомая величина $U_{кр}$. Основу математических операций составляет теорема о взаимозаменяемости парных чисел. Из нее следует, что в случае наличия определенной относительной величины, являющейся качественной формой двух случайных аргументов, установление обратного аргумента по конечному значению относительной величины с допущением по вариации второго аргумента также является действенной мерой математических преобразований. Таким образом, приняв в качестве истинного оператора, значение искомой эксплуатационной характеристики в момент возникновения отказа отдельного вида, определяется ее граничное значение, при котором инициируется процесс перехода системы из полностью работоспособного состояния, в состояние по принятому к расчету виду отказа. В соответствии с вышесказанным математическая модель по определению граничных условий функционирования методики качественного прогнозирования отказов оборудования, была выражена в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{KP} = \frac{(r_{xy})_{kp}}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum (x - \bar{x})^2}} + \bar{y} \\ y_i \geq y_{KP} \\ \forall t \in Q \end{array} \right. ; \quad (5)$$

где $(r_{xy})_{kp}$ – коэффициент парной корреляции между соответствующими эксплуатационными характеристиками оборудования в момент времени, предшествующий появлению отказа;

$y - \bar{y}$ – разность между значениями определяемой эксплуатационной характеристики и ее средним значением за интервал наблюдения t (устанавливается для аварийного режима эксплуатации оборудования по определенному виду отказа, в соответствии с трендами данных за отчетный период);

$x - \bar{x}$ – разность между значениями смежной с определяемой эксплуатационной характеристики и ее абсолютным значением в момент отказа (значения устанавливаются для номинального режима эксплуатации оборудования);

Q – временное пространство эксперимента (наблюдения за состоянием СТС).

Таким образом, разработанная методика качественного прогнозирования отказов СТС позволяет определять условия образования дефектов, приводящих к отказам оборудования, текущую вероятность и ожидаемое время появления отказов, а также оперативный коэффициент готовности СТС к работе.

На основании значений коэффициента готовности проводится оценка необходимости проведения очередной ТОР либо корректировка утвержденного графика выполнения ППР, включая возможное изменение содержания планируемых работ. Таким образом, осуществляется управление надежностью оборудования в результате регулирования основных процессов по поддержанию его работоспособного состояния в процессе эксплуатации.

В **четвертой главе** разработана методика количественного прогнозирования отказов СТС, а также сформированы основные положения аппарата управления надежностью эксплуатируемого оборудования с использованием механизма регулирования технологических процессов по его производству. В качестве исходных данных к разработке методики принималась статистическая информация о количестве, времени и причинах отдельных отказов, а также условиях их возникновения. При этом при реализации метода обеспечивается дополняемость метода качественного прогнозирования отказов, где искомым аргументом является аппроксимированная по всему интервалу наработок интенсивность отказов СТС. Первой решаемой задачей стала разработка математической модели для определения наработки оборудования, соответствующей его переходу из этапа приработки в зону устойчивой эксплуатации. Для этого использовалась статистическая информация о состоянии нефтеперекачивающих агрегатов по одному из дочерних обществ ПАО «Транснефть». На рисунке 5 представлено

распределение интенсивности отказов НПА, принятое в качестве базового для разработки методики.

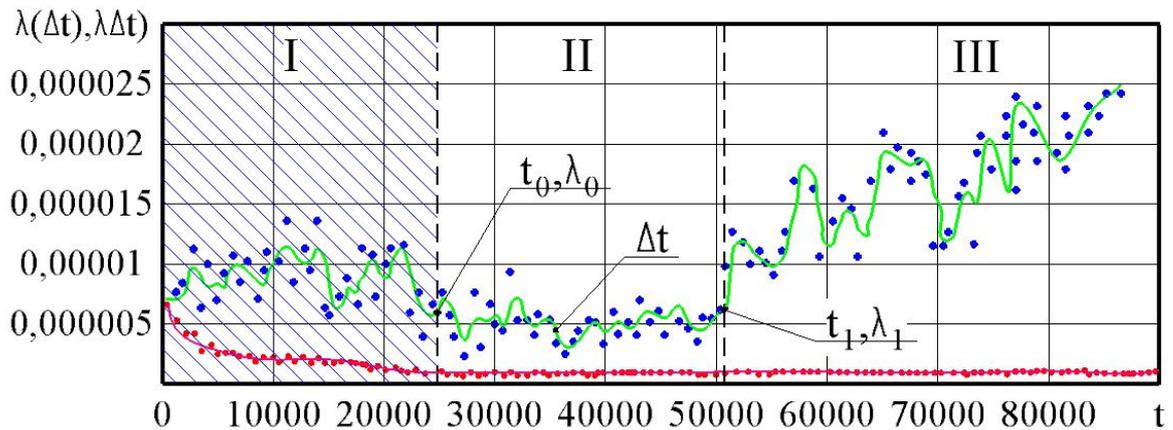


Рисунок 5 – График распределения $\lambda(\Delta t)_i - t_i$ и $\lambda(t)_i - t_i$ для оборудования НПА

В соответствии с рисунком 5 было установлено, что при переходе функции $\lambda(\Delta t)$ из этапа I в этап II наблюдается снижение ее скорости роста, и в определенной точке с координатами t_0, λ_0 скорость роста функции $\lambda(\Delta t)$ по приращению аргумента Δt_i становится равной нулю. После чего наблюдается ее стационарное состояние, соответствующее этапу устойчивой эксплуатации (этап II), до некоторой точки с координатами t_1, λ_1 , в которой осуществляется переход из этапа устойчивой эксплуатации в этап износа оборудования (этап III). Для математического описания точки, характеризующей стационарное положение функции (скорости роста равна нулю), в качестве основного метода анализа использовался принцип аппроксимации. В данном случае аппроксимирующая функция, использовалась для установления интенсивности отказов СТС, характерной для зоны устойчивой эксплуатации. Так как аппроксимирующая функция $\lambda(\Delta t)$ имеет одну точку перегиба, приходящуюся на координаты t_0, λ_0 , то в соответствии с ее физическим смыслом – оптимальное значение гарантийного периода эксплуатации оборудования, и базовым принципом баланса потоков событий, наработка t_0 определяется по формуле:

$$t_0 = t_i + \left(\frac{r(\Delta t)_i}{N_{i-1} \cdot t_i - \frac{r(\Delta t)_i \cdot t_i}{2}} - \lambda_0 \right) \cdot \frac{\left(N_{i-1} \cdot t_i - \frac{t_i \cdot r(\Delta t)_i}{2} \right)^2}{-N_{i-1} \cdot r(\Delta t)_i + \frac{r(\Delta t)_i^2}{2}} \quad (6)$$

Необходимо отметить, что полученная зависимость (6) содержит ряд переменных, диапазон значений был конкретизирован, в связи с обширной областью проводимых исследований, характерной для всего жизненного цикла СТС.

Конкретизация значений $t_i, N_{i-1}, r(\Delta t)_i, \lambda_0$ была проведена эмпирическим путем в соответствии со сформированными начальными и граничными условиями:

$$t_0 = t_{0,5MAX} - \left(\frac{\sum r(\Delta t)_i}{\sum N_{\max, \min} \cdot t_{0,5MAX} - \frac{\sum r(\Delta t)_i \cdot t_{0,5MAX}}{2}} - \bar{\lambda} \right) \cdot \frac{\left(\sum N_{\max, \min} \cdot t_{0,5MAX} - \frac{t_{0,5MAX} \cdot \sum r(\Delta t)_i}{2} \right)^2}{-\sum N_{\max, \min} \cdot \sum r(\Delta t)_i + \frac{\sum r(\Delta t)_i^2}{2}} \quad (7)$$

где t_i – наработка, соответствующая половине жизненного цикла оборудования, $t_{0,5MAX}$. Использование этой величины при математических расчетах, характеризует симметрию модели относительно центра диапазона анализируемых значений наработки оборудования.

N_{i-1} – сумма максимальных и минимальных значений исправно работающего оборудования, характерных для отдельных интервалов эксплуатации, $\sum N_{\max, \min}$. Использование этой величины при математических расчетах, характеризует точки экстремума функции распределения исправно работающего оборудования по соответствующим интервалам наработки.

λ_0 – среднее для всего жизненного цикла значение интенсивности отказов оборудования, $\bar{\lambda}$. Использование этой величины при математических расчетах, характеризует обобщенный по всему диапазону наработок поток отказов оборудования.

$r(\Delta t)_i$ – суммарное для всего жизненного цикла количество отказов оборудования, $\sum r(\Delta t)_i$. Использование этой величины при математических расчетах, характеризует общий уровень дефектности оборудования по всему диапазону наработок.

Полученная зависимость (7) в результате использования актуальной информации о состоянии СТС, принимает не только описательный, но и прогнозный характер, что позволяет осуществлять аналитический расчет функции распределения интенсивности отказов оборудования на ограниченном интервале наработок $[0, t_0]$.

При этом из математической постановкой задачи указанный прогнозный интервал должен составлять $[0; n]$, где n – наработка, соответствующая времени окончания эксплуатации оборудования. В соответствии с вышесказанным интервал наработок, на котором возможно осуществлять прогнозирование отказов СТС, был расширен на $(n + t_0)$, в результате построения математической модели основанной на теории Марковским процессов. В качестве основного положения разработанной математической модели было использовано свойство Марковских цепей, заключающееся в возможности определения состояния оборудования в момент времени $i+1$, располагая информацией о его состоянии в момент начала прогнозирования i . В качестве прогнозируемых параметров принимается количество отказов системы и смежная с ними плотность распределения вероятности отказов.

При этом в качестве основного критерия к управлению надежностью оборудования на этапе эксплуатации была принята плотность распределения вероятности отказов.

Вывод искомой зависимости осуществлялся в соответствии с условиями, представленными на расчетной схеме (рисунок 6). В соответствии с начальными условиями, определение количества отказов на отдельном временном интервале Δt_i осуществляется при известном распределении интенсивности отказов оборудования λ_i , установленном для всего интервала прогнозирования технического состояния системы, а также при известном на момент начала проведения анализа Δt_{i-1} количестве отказов оборудования $r(\Delta t)_{i-1}$.

Штриховой областью на рисунке 6 изображен первый по порядку временной интервал, подлежащий прогнозированию; розовой – временной интервал соответствующий моменту начала прогнозирования.

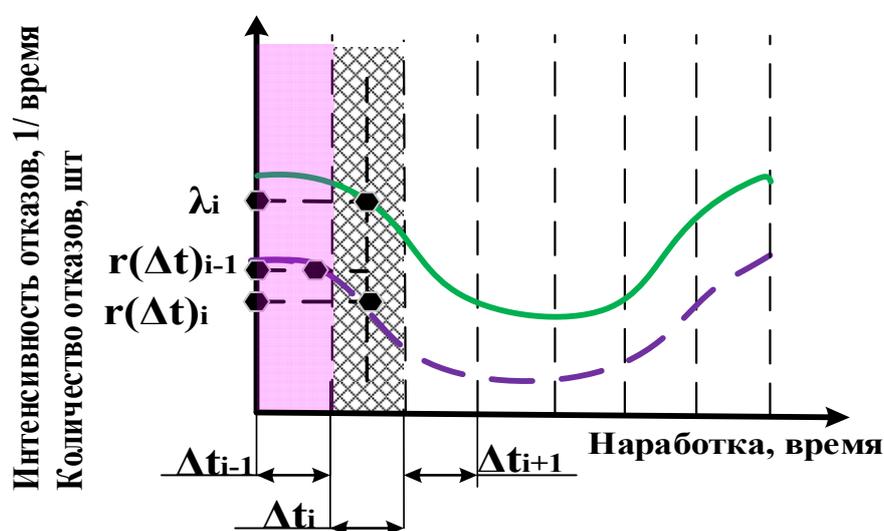


Рисунок 6 – Расчётный график для прогнозирования количества отказов оборудования по времени

В результате, была получена зависимость позволяющая осуществлять прогнозирование количества отказов оборудования на временном интервале $[0;n]$:

$$r(\Delta t)_i = \frac{[\lambda_i \cdot N_0 - \sum r(\Delta t)_{i-1} \cdot \lambda_{i-1}] \cdot \Delta t}{(1 + \frac{\lambda_i \cdot \Delta t}{2})} \cdot (1 + P_i)^{\lambda_{cp} \cdot t_0}; \quad (8)$$

где λ_i – общая интенсивность отказов определённого вида оборудования, установленная в целом по Компании на прогнозируемом интервале времени;

$\sum r(\Delta t)_{i-1}$ – суммарное количество отказов оборудования на интервалах времени, предшествующих прогнозируемому интервалу;

λ_{i-1} – общая интенсивность отказов определённого вида оборудования, установленная в целом по Компании, на интервале времени, предшествующем прогнозируемому.

Δt – значение интервала наработки, применяемое для анализа по прогнозированию количества отказов.

P_i – значение вероятности безотказной работы, характерное для анализируемого интервала наработки оборудования.

При этом для определения плотности распределения вероятности появления отказов (далее ПРВ) СТС при их известном прогнозном количестве, используется формула:

$$\rho = \frac{dr \cdot (\Delta t_i)}{d\lambda_i} \quad (9)$$

При этом, располагая информацией о ПРВ появления отказов в нормальных условиях эксплуатации оборудования становится возможным осуществить регулирование его качества. При этом принимается, что увеличение ПРВ появления отказов СТС, в процессе их эксплуатации, выше установленного нормативного значения, характеризует присутствие скрытого заводского дефекта. То есть данный расчетный случай, был принят в качестве приемочного критерия для обоснования необходимости проведения проверки условий производства оборудования, в результате организации внеплановой инспекции и периодических испытаний оборудования. Необходимо отметить, что в качестве частного случая, принимается следствие от превышения ПРВ появления отказов своего нормативного значения, заключающееся в возможном изменении условий эксплуатации оборудования (в результате увеличения агрессивности перекачиваемой среды, увеличения степени загрузки оборудования и увеличения количества его пусков и остановок и т.д.). В качестве основного вида воздействий упомянутых изменений на СТС, принимается увеличение напряжений на отдельные конструктивные узлы. В свою очередь наличие динамики роста напряжений, свидетельствует о необходимости корректировки технических требований к качеству эксплуатируемого оборудования, либо корректировки условий его производства, что требует изменения объема и периодичности проведения плановой, повторной, внеплановой инспекции производства, а также периодических испытаний оборудования. Таким образом, обеспечивается управляемость надежностью эксплуатируемого оборудования на этапе его изготовления с использованием механизма оценки соответствия, характеризующего комплекс мероприятий по регулированию условий его производства (рисунок 7).

Также применение положений теории случайных процессов (Марковских цепей) в качестве способа анализа позволило разработать комплекс математических моделей позволяющих конкретизировать отдельные этапы эксплуатации системы временем появления, наиболее характерных для нее видов отказов. Разработанный комплекс моделей основан на применении систем уравнений Колмогорова-Чепмена, сформированных в соответствии с выделенным количеством базовых состояний НПА, представленных в виде размеченного графа-состояний (рисунок 7).

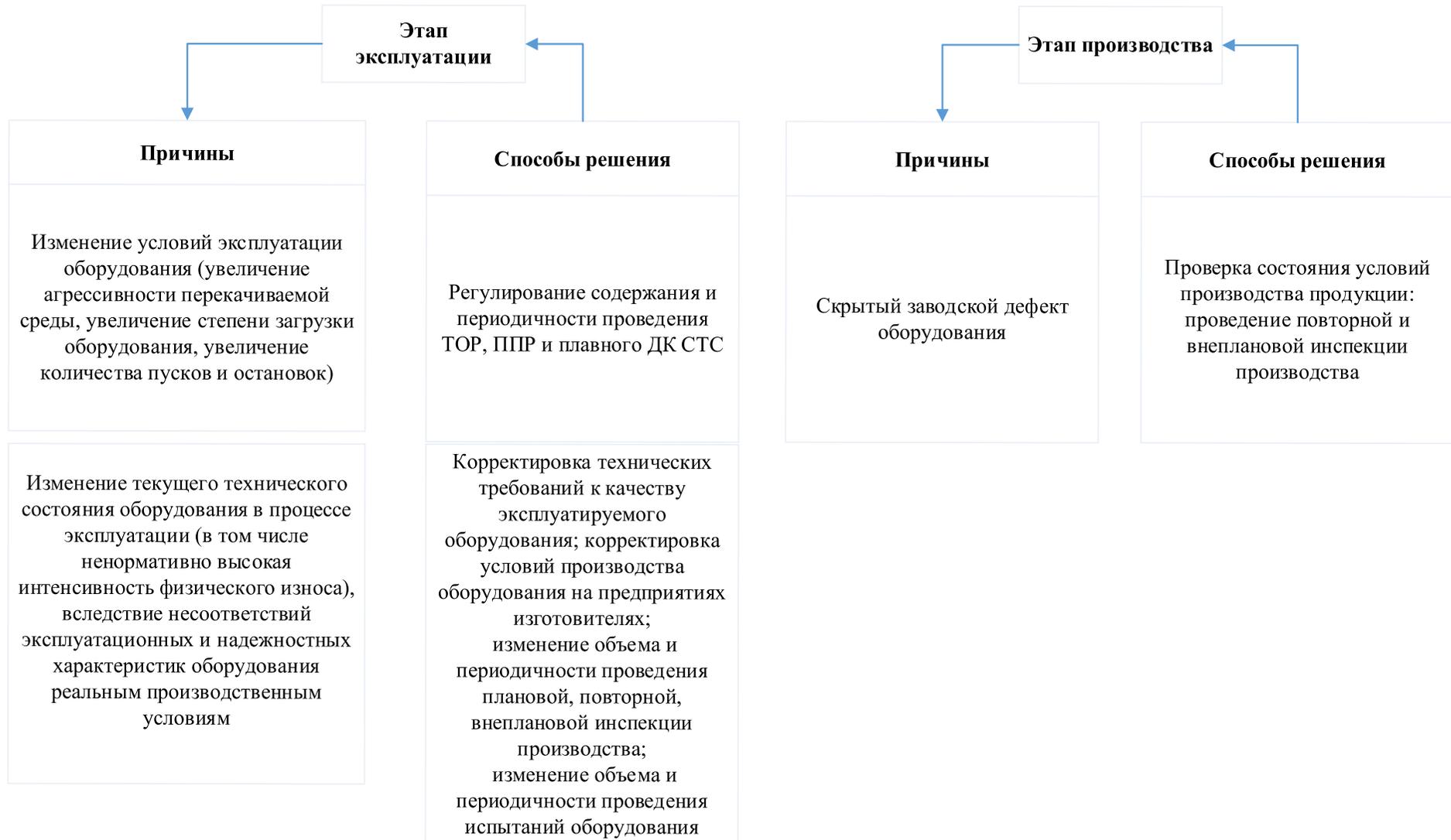


Рисунок 7 – Комплексная программа по управлению надежностью СТС с использованием основных принципов методики количественного прогнозирования отказов

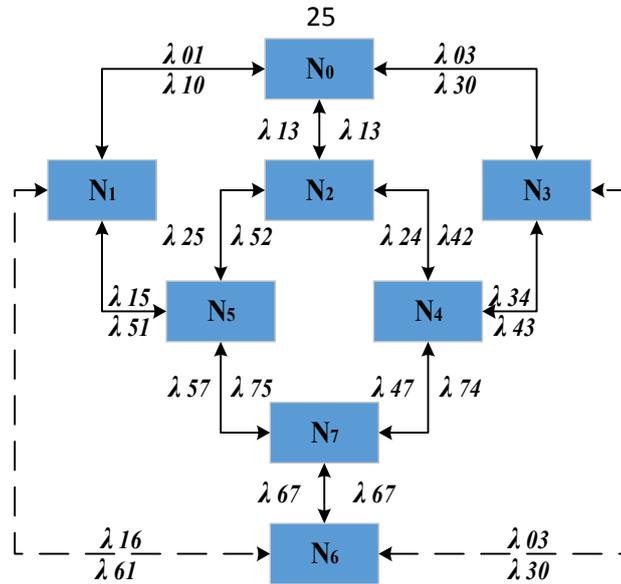


Рисунок 8 – Размеченный граф-состояний НПА

Интенсивность перехода НПА из работоспособного в частично работоспособное или полностью неработоспособное состояние определяется в соответствии с уравнением:

$$\lambda_{01} = \frac{1}{T_{\text{ср.раб}}} \quad (10)$$

где \$T_{\text{ср.раб}}\$ – среднее время безотказной работы НПА.

Интенсивность перехода СТС из частично работоспособного или полностью неработоспособного в работоспособное состояние определяется в соответствии с уравнением:

$$\mu_{10} = \frac{1}{T_{\text{ср.рем}}} \quad (11)$$

где \$T_{\text{ср.рем}}\$ – среднее время ремонта НПА.

С учетом размеченного графа-состояний НПА и уравнений (10), (11), время нахождения системы в любом из принятых к анализу состояний, устанавливается из их финальных вероятностей, определяемых в соответствии с системой уравнений:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda_{01} + \lambda_{02}}{\mu_{40} + \mu_{20}}\right) \cdot n} \\ P_1 = \frac{(\lambda_{01} + \lambda_{02}) \cdot P_0}{\mu_{40}} + \frac{\mu_{20}}{\mu_{40}} + \frac{\lambda_{13} \cdot \mu_{20}}{\mu_{40} \cdot (\mu_{51} + \mu_{52})} + \left(\frac{\lambda_{23}}{\mu_{51} + \mu_{52}}\right) - \frac{\lambda_{13} \cdot (\lambda_{01} + \lambda_{02}) \cdot P_0}{\mu_{40} \cdot (\mu_{51} + \mu_{52})} \\ P_2 = \frac{(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03})P_0 - \mu_{40}P_1 - \mu_{30}P_3}{\mu_{20}} \end{cases} \quad \begin{cases} P_3 = 1 - P_0 - P_1 - P_4 \\ P_4 = \frac{\lambda_{24}P_2 + \lambda_{34}P_3 + \mu_{74}P_7}{\mu_{43} + \mu_{42} + \lambda_{47}} \\ P_5 = \frac{(\mu_{20} + \lambda_{25} + \lambda_{24})P_2 - \lambda_{02}P_0 - \mu_{42}P_4}{\mu_{52}} \\ P_6 = \frac{(\lambda_{01} + \lambda_{02}) \cdot P_0 - \lambda_{02} \cdot P_1}{\mu_{10}} \\ P_7 = \frac{(\mu_{61} + \mu_{63} + \lambda_{67})P_6 - \lambda_{16}P_1 - \lambda_{36}P_3}{\mu_{76}} \end{cases} \quad (12)$$

где P_0 – финальная вероятность безаварийного режима работы системы; P_1 – финальная вероятность отказа магистрального насоса; P_2 – финальная вероятность отказа электродвигателя; P_3 – финальная вероятность отказа муфты магистрального насоса; P_4 – финальная вероятность единовременного отказа магистрального насоса и муфты магистрального насоса; P_5 – финальная вероятность единовременного отказа магистрального насоса и электродвигателя; P_6 – финальная вероятность единовременного отказа электродвигателя и муфты магистрального насоса; P_7 – финальная вероятность единовременного отказа магистрального насоса, электродвигателя и муфты магистрального насоса.

При этом финальная вероятность отдельного состояния характеризует среднее время пребывания в нем системы. Следующим этапом стала конкретизация установленных финальных вероятностей состояний НПА на принятые к анализу наиболее характерные виды отказов, учитывающая их удельное количество для каждого анализируемого вида и соответствующую ему интенсивность. Заключительным этапом становится определение ожидаемого времени появления отказов, определяемого в соответствии с уравнением (3). Основные виды свойственных для НПА отказов, с соответствующими их характеристиками потока отказов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики видов отказов, наиболее характерных для НПА

№ п/п	Вид отказа	Интенсивность, 1/час	Среднее время наступления, год
1	Повышенная максимальная вибрация переднего подшипника насоса	0,00018415	2,45
2	Аварийно-максимальные утечки через торцевые уплотнения магистрального насоса	0,0018	0,205
3	Максимальное осевое смещение ротора магистрального насоса	0,00012	3,91
4	Аварийная температура обмоток статора электродвигателя	0,000277	2,2
5	Повышенная вертикальная и горизонтальная вибрация подшипников электродвигателя	0,00020578	3,67
6	Аварийная температура обмоток ротора электродвигателя	0,00046	1,63

В соответствии с данными по времени наступления наиболее характерных отказов оборудования НПА был сформирован график его жизненного цикла, представленный в виде распределения отказов по суммарной наработке системы

(на рисунке 9 представлено распределение отказов магистральных насосов серии НМ).

Использование сформированного распределения отказов системы по ее суммарной наработке позволяет осуществлять регулирование качества оборудования, в результате корректировки периодичности проведения ремонтных работ, в случае обслуживания системы в соответствии с утвержденным графиком планово-предупредительных работ (далее ППР), или корректировки периодичности проведения планового диагностического контроля, в случае применения организации обслуживающих и ремонтных работ системы по принципу техническое обслуживание и ремонт по текущему техническому состоянию (далее ТОР).

В связи с тем, что большинство технических систем, эксплуатируемых в трубопроводном транспорте углеводородного сырья и продуктов его переработки, обслуживаются с применением ППР, в работе был рассмотрен способ регулирования качества оборудования, с применением корректировки периодичности проведения текущих ремонтов (далее ТР).

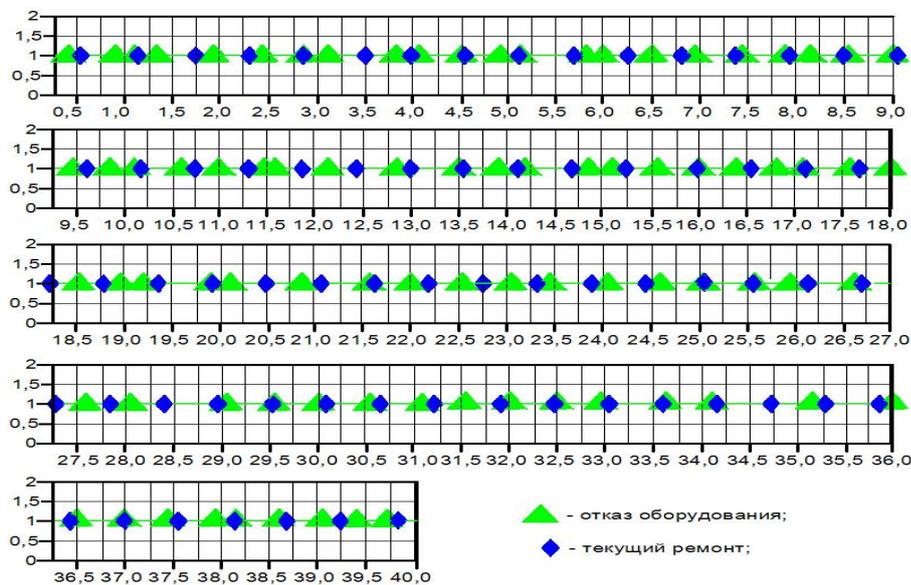


Рисунок 9 – График распределения отказов магистральных насосов серии НМ по их суммарной наработке

В соответствии с задачей исследований необходимой мерой обеспечения надежности оборудования является предупреждение максимального количества отказов при установленных затратах на реализацию работ по поддержанию его работоспособного состояния.

Таким образом, условие определения оптимальной периодичности проведения ремонтных работ принимает вид:

$$\tau_i \rightarrow \tau_{TP,CP,CP}, \quad (13)$$

где $\tau_{TP,CP,CP}$ – периодичность проведения ремонтных работ.

В качестве критерия оптимальности принимается степень приближения времени появления отказа СТС к периодичности проведения ремонтных работ:

$$\Delta_i = \frac{\tau_{ТР}^j - \tau_{ДЕФ}^j}{\tau_{ТР}^j}, \quad (14)$$

где $\tau_{ДЕФ}^j$ – время образования дефекта (индекс i характеризует повторяемость отдельного дефекта по времени эксплуатации оборудования – в случае наличия возможности таковой).

Графическая интерпретация степени приближения времени появления отказов НПА к периодичности проведения ТР также представлена на рисунке 9.

В качестве критерия оценки эффективности установленной периодичности проведения ремонтных работ была принята общая погрешность вычислений, определенная для всего массива данных по времени появления отказов:

$$\Delta_{ОБЩ} = \frac{\Delta_i}{n}, \quad (15)$$

где n – количество элементов в выборке.

Регулирование качества магистральных насосов осуществлялось из соображения, что уменьшение межремонтного интервала магистральных насосов, будет способствовать большей концентрации проводимых работ, в соответствии с чем оптимизация периодичности их проведения, реализована в сторону уменьшения усредненного нормативного значения (нормативная периодичность проведения текущих ремонтных работ магистральных насосов серии НМ составляет 6000 часов). К расчету были приняты следующие значения $\tau_{ТРj}$: 5000, 4000, 3000, 2000 часов. Результаты расчета по определению оптимальной периодичности обслуживания магистральных насосов серии НМ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчёта по определению оптимальной периодичности проведения ремонтных работ магистральных насосов серии НМ

Параметр	6000	5000	4000	3000	2000
$\max\{\tau_{ТР}^j - \tau_{ДЕФ}^i\}$	5997,8	4997,83	3995,7	2997,827	1997,827
$\Delta_{общ}$	0,4877	0,489	0,4806	0,4808	0,496

В соответствии с таблицей 2 оптимальная периодичность проведения ремонтных работ магистральных насосов серии НМ составляет 4000 часов, при этом уменьшение их периодичности на всех этапах эксплуатации магистральных насосов приведет к значительному увеличению затрат на поддержание работоспособного состояния. Таким образом, данный вид регулирования предлагается применять исключительно на этапе приработки оборудования, в связи с повышенной

интенсивность отказов (рисунок 5), с последующим увеличением периодичности проведения ТР на этапах эксплуатации, характеризующихся постоянным значением интенсивности отказов (этап устойчивой эксплуатации). Как показывает практика реализация ТР с периодичностью в 6000 часов, приводит к замене отдельных узлов магистральных насосов с невыработанным остаточным ресурсом. То есть уменьшение периодичности проведения ремонтных работ на этапе приработки, с последующим увеличением периодичности на этапе устойчивой эксплуатации, позволит предупредить большее количество отказов СТС, с сохранением установленных затрат на реализацию работ по поддержанию их работоспособного состояния.

В пятой главе разработана методика по управлению качеством производства оборудования и обобщены основные положения методологии управления его качеством для всего жизненного цикла.

Методика управления качеством производства оборудования основывается на выявлении основных факторов, влияющих на производство оборудования со скрытым заводским дефектом, приводящих к отказам оборудования в процессе эксплуатации, а также установлении вероятности его появления. Исходными данными к разработке методики является следующая статистическая информация, выявляемая в ходе эксплуатации оборудования:

- количество отказов анализируемых СТС;
- вероятность появления отдельных видов отказов анализируемых СТС.
- причины появления анализируемых видов отказов.

Основным положением разрабатываемой методики является установление качественных соответствий особенностей применяемых СТС с реальными условиями их эксплуатации. При этом рассматриваются следующие положения расследований инцидентов, связанных с переходом оборудования в ненормативное (частично неработоспособное или полностью неработоспособное) состояние:

- технологические причины, влияющие на появление отказов оборудования (смена режимов перекачки, обуславливающая количество пусков и остановок агрегатов, степень их использования (количество циклов нагружения, продолжительность простоев оборудования, продолжительность непрерывной эксплуатации));

- внутренние факторы, характеризующие нормативность эксплуатации СТС, и обуславливающие степень безопасности их использования с привязкой к состоянию вспомогательных технических систем, таких как питающие, диагностирующие и обслуживающие комплексы и устройства;

- сторонние факторы (включая человеческий), характеризующие нормативность проведения ремонтных и обслуживающих работ СТС по поддержанию их работоспособного состояния в процессе эксплуатации.

Разработанная методика предусматривает рассмотрение отдельных процессов производства оборудования с позиции их дифференциации по обособленным технологическим признакам, обусловленных особенностями изготовления конструктивных узлов и деталей СТС. Указанная дифференциация включает иерархическую разбивку технических процессов с точки зрения удельных видов операций приходящихся на единицу выделенного этапа производства (пример

дифференцирования производственных процессов по обособленным технологическим признакам для магистрального насоса представлен на рисунке 10).

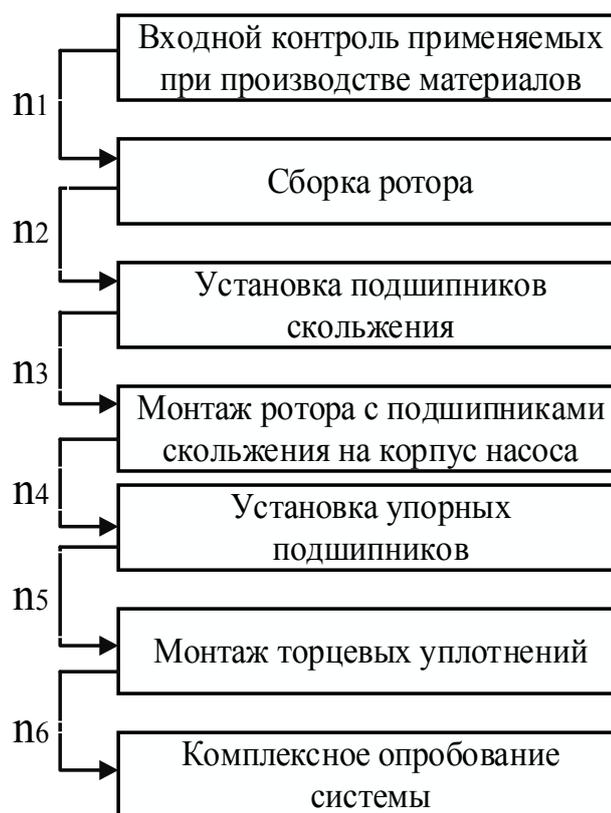


Рисунок 10 – Дифференцирование производственных процессов по изготовлению магистральных насосов в соответствии с обособленными технологическими признаками

Каждый из выделенных производственных процессов характеризуется отдельным долевым участием в появлении заводского брака при изготовлении оборудования, выраженным удельной вероятностью появления отказа СТС в соответствии с осуществляемыми на рассматриваемом этапе производства технологическими операциями. При этом в качестве исходного источника информации для реализации указанной дифференциации принимаются акты расследований отказов СТС, формируемые при их эксплуатации в случае выхода системы из регламентированного технического состояния.

Расчет полной вероятности отказов СТС рассчитывается в соответствии со статистическими данными, фиксируемыми в базе данных по оценке качества оборудования, таким образом, указанный информационный ресурс является базовым при реализации разработанной методики.

Принимается, что на каждом этапе производства СТС существует вероятность возникновения дефекта: по причине техногенного, технологического либо человеческого фактора.

Следовательно, расчетные математические модели, используемые для описания отдельных этапов производства, были дифференцированы по количеству входных, срединных и выходных параметров.

В качестве базовой к разработке методики была принята система уравнений:

$$\begin{cases} A = \sum A_i \\ B = \prod B_i \end{cases} \quad (16)$$

где A – событие, заключающееся в появлении брака СТС при ее производстве;
 B – событие, заключающееся в отсутствии брака СТС при ее производстве.

В работе были разработаны две математические модели, характеризующие технологические процессы производства СТС. В качестве базовых были приняты последовательная и параллельная схемы организации производства СТС. При этом априорно установлено, что параллельная схема предусматривает как наличие математических моделей с двумя входными параметрами (вероятность наличия заводского брака на независимом производственном этапе не установлена, и данное событие имеет равновероятную вероятность исхода), так и с одним входным параметром (вероятность наличия заводского брака на независимом производственном этапе установлена и абсолютно предопределена). Последовательная схема в основном предусматривает применение математических моделей с одним входным параметром, при этом использование математической модели с двумя входными параметрами возможно только на первом этапе реализации технологических процессов по производству СТС, так как только выделенный интервал является единственным статически неопределенным.

Входными параметрами к разработанным математическим моделям являются некоторые переменные L и L' ; где L – частность события, заключающаяся в отсутствии дефекта на предыдущем подпроцессе; L' – частность события, заключающаяся в наличии дефекта на предыдущем подпроцессе.

Для математической модели с двумя входными параметрами, указанные частности расположены на верхней грани куба в угловых точках соответственно, таким образом, чтобы две угловые точки, расположенные слева, имели только положительный исход, а две угловые точки, расположенные справа, имели только отрицательный исход.

В качестве срединных параметров принимается вариативный ряд переменных x , x' , x'' , характеризующий частоты отсутствия и появления брака оборудования на выделенном этапе производства.

При этом диапазон частот соответствующих упомянутому вариативному ряду, определяется эмпирическим путем в ходе проведения следующих мероприятий оценки соответствия: экспертиза технической документации, первичная инспекция производства, приемочные и приемо-сдаточные испытания оборудования, при проведении которых выявляются основные факторы влияющие на отрицательный результат производственного процесса, а также устанавливается условная вероятность их влияния на наступление отрицательного исхода, выражаемая в виде ряда частот событий (графическая интерпретация представлена на рисунке 11).

P_1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	...	P_{1n}
P_2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	...	P_{2n}
• • • • •						
P_3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	...	P_{3n}

Рисунок 11 – Представление удельных вероятностей влияния отдельных производственных факторов на появление отказов СТС

В данном случае в ходе проведения экспертизы технической документации определяются удельные вероятности влияния отдельных технологических факторов, выявляемые в соответствии с действующими ТУ предприятий-изготовителей продукции. Проведение первичной инспекции производства, а так же приемочных и приемо-сдаточных испытаний позволяет установить вариативные значения упомянутых вероятностей по техногенным и внутренним факторам.

Таким образом, обеспечивается взаимосвязь организационно-технических мероприятий по управлению качеством оборудования с разработанным вероятностно-статистическим аппаратом.

Применение метода динамического программирования позволило разработать системы уравнений для численного определения выходных параметров, характеризующих исход производственного этапа, через установленные с использованием организационно-технических мероприятий значения срединных параметров, используемых в математических моделях.

Также, одним из основных аспектов, решенных в результате моделирования процессов производства оборудования, является установление зависимостей по переводу неколичественной вероятностной меры, характеризующей определенный исход в события, в количественную величину, описываемую энтропией вероятности и количеством информации, для дальнейшего использования в корреляционно-регрессионном анализе по выявлению наиболее влияющих на появление заводского брака факторов.

Таким образом, система уравнений конкретизирующая входные и срединные параметры по энтропии вероятности и количеству информации и определяющая выходные параметры (с использованием срединных и входных параметров, также выраженных через энтропию вероятности и количество информации) для кубической математической была представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l}
h\{V'(x', x'')\} = -\frac{1}{4} \cdot \left[-x' \cdot x''^2 - \frac{2}{9} \cdot (x' + x'' - 1)^3 - (x' - 2) \cdot x' \cdot x'' + \frac{2}{3} \cdot (x' + x'' - 1)^3 \cdot \log(-x' - x'' + 1) \right] + const \\
h\{V(x', x'')\} = \frac{1}{36} \cdot \left[x'' \cdot (15 \cdot x'^2 + 15 \cdot x' \cdot x'' + 2 \cdot x''^2) - 6 \cdot (x' + x'')^3 \cdot \log(x' + x'') \right] + const \\
h\{V(x)\} = -\int x \cdot \log(x) \cdot dx = -\frac{1}{4} \cdot x^2 \cdot (2 \cdot \log(x) - 1) + const \\
I(x) = -\frac{1}{4} \cdot x^2 \cdot (2 \cdot \log(x) - 1) + const \\
I(x') = -\frac{1}{4} \cdot x'^2 \cdot (2 \cdot \log(x') - 1) + const \\
I(x'') = -\frac{1}{4} \cdot x''^2 \cdot (2 \cdot \log(x'') - 1) + const \\
I(L) = -\frac{1}{4} \cdot L^2 \cdot (2 \cdot \log(L) - 1) + const \\
I(L') = -\frac{1}{4} \cdot L'^2 \cdot (2 \cdot \log(L') - 1) + const
\end{array} \right. \quad (17)$$

Система уравнений конкретизирующая входные и срединные параметры по энтропии вероятности и количеству информации и определяющая выходные параметры (с использованием срединных и выходных параметров, также выраженных через энтропию вероятности и количество информации) для тетраэдрической математической модели была представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l}
h\{V'(x)\} = \frac{1}{4} \cdot (2 \cdot (x - 1)^2 \cdot \log(1 - x) - (x - 2) \cdot x) \\
h\{V(x)\} = -\frac{1}{4} \cdot x^2 \cdot (2 \cdot \log(x) - 1); \\
I(x) = -\frac{1}{4} \cdot x^2 \cdot (2 \cdot \log(x) - 1) + const ; \\
I(x') = -\frac{1}{4} \cdot x'^2 \cdot (2 \cdot \log(x') - 1) + const ; \\
I(x'') = -\frac{1}{4} \cdot x''^2 \cdot (2 \cdot \log(x'') - 1) + const ; \\
I(L) = -\frac{1}{4} \cdot L^2 \cdot (2 \cdot \log(L) - 1) + const . \\
I(L') = -\frac{1}{4} \cdot L'^2 \cdot (2 \cdot \log(L') - 1) + const ;
\end{array} \right. \quad (18)$$

Получаемые из систем уравнений (17), (18) значения входных, срединных и выходных параметров используются в корреляционно-регрессионном анализе, в котором выборка по входным и срединным параметрам коррелируется с выборкой по выходным параметрам производственного этапа.

В результате чего из общего вариативного ряда выделяются наиболее влияющие на появление заводского брака факторы, описываемые соответствующим вероятностным множеством.

Заключительной операцией становится упорядочивание полученных вероятностных выборок с использованием регрессионного анализа, позволяющего выделить наиболее значительный сегмент вероятностного множества, исходя из критичности значений коэффициентов парной корреляции для соответствующих групп параметров.

При этом решается обратная задача по определению полной вероятности появления дефекта заводского характера СТС при ее производстве для дальнейшего использования полученной информации в процессе прогнозирования технического состояния по времени эксплуатации.

Основной решаемой проблематикой здесь является выявление полного объема оборудования со скрытыми заводскими дефектами, поступающей на производственные объекты организаций нефтегазового комплекса. Главное направление реализованных исследований заключается в прогнозировании общего количества отказов СТС, вызванных не эксплуатационными факторами.

Базовые формулы, используемые для определения вероятности появления отказов СТС, при их производстве были получены в соответствии с теоремой Байеса:

$$P(H_i) \cdot P\left(\frac{A_i}{H_i}\right) = \varepsilon_i \cdot [(y'_j, y''_j, \dots, y_j^{+n}), (x'_j, x''_j, \dots, x_j^{+n}), \dots, (z'_j, z''_j, \dots, z_j^{+n})] \quad (19)$$

$$P\left(\frac{B_i}{T_i}\right) = \frac{\varepsilon_i \cdot [(y_j, x_j, \dots, z_j), (y^*_j, x^*_j, z_j^*)]}{\varepsilon_i \cdot [(y_j, x_j, \dots, z_j), (y^*_j, x^*_j, z_j^*)] + \{1 - \varepsilon_i\} \cdot \{1 - [(y_j, x_j, \dots, z_j), (y^*_j, x^*_j, z_j^*)]\}} \quad (20)$$

где $(y'_j, y''_j, \dots, y_j^{+n})_1$ – множество срединных параметров для модели, описываемой одним входным параметром;

$(x'_j, x''_j, \dots, x_j^{+n})_2$ – множество срединных параметров для модели, описываемой двумя входными параметрами;

$(z'_j, z''_j, \dots, z_j^{+n})_n$ – множество срединных параметров для модели, описываемой n входными параметрами.

В соответствии с зависимостями (19), (20) вероятность производства СТС со скрытым заводским браком рассчитывается по формуле:

$$P(A) = \max \left[P \cdot \left(\frac{H_{i0}}{A_1} \right), P \cdot \left(\frac{H_{i+1}}{A_2} \right), \dots, P \cdot \left(\frac{H_{i+n-1}}{A_n} \right) \right], \quad (21)$$

где H_{i0} – гипотеза о появлении дефекта в момент предшествующем первому производственному этапу, в данном случае подразумевается появление дефекта в результате влияния какого-либо внешнего фактора, независящего от данного производственного цикла (например, использование дефектного сырья, либо появление дефекта в таковом при его транспортировке для реализации первого производственного этапа и т.д.).

Аналогично с уравнением (21) определяется вероятность производства СТС без скрытого заводского брака:

$$P(B) = P\left(\frac{T_{i_0}}{B_1}\right) \cdot P\left(\frac{T_{i+1}}{B_2}\right), \dots, P\left(\frac{T_{i+n-1}}{B_n}\right), \quad (22)$$

где T_{i_0} – гипотеза об отсутствии дефекта на этапе предшествующем первому производственному этапу, в данном случае подразумевается отсутствие дефекта в результате влияния какого-либо внешнего фактора, независящего от данного производственного цикла.

Таким образом, осуществляется решение задачи по управлению качеством оборудования на этапе его производства. Все выявленные несоответствия технологических процессов, задействованных при производстве СТС, действующим техническим требованиям к качеству эксплуатируемого оборудования, а также несоответствия технических требований реальным эксплуатационным условиям устраняются в результате реализации следующего комплекса организационно-технических мероприятий (далее ОТМ):

- экспертиза технической документации;
- первичная инспекция производства;
- приемо-сдаточные и приемочные испытания оборудования.

При этом вносимые изменения в упомянутые выше ОТМ имеют научную обоснованность, в результате проведения соответствующих НИОКР по видам проблематик, выявленных в ходе эксплуатации СТС и имеющих заводской характер первопричины появления.

В соответствии с разработанными методиками, методология управления качеством оборудования на всех интервалах его жизненного цикла, принимает вид, представленный на рисунке 12.

Регулирование качеством оборудования осуществляется в результате реализации научно-исследовательских и организационно-технических мероприятий, как на стадии ее производства, так и на стадии эксплуатации.

Входными данными к реализации сформированной методологии являются: эксплуатационные данные использования СТС в нормальном режиме; эксплуатационные данные использования СТС в аварийном режиме; статистическая информация по количеству отказов СТС, а также причинам их появления; статистическая информация по видам и соответствующим им интенсивностям отказов СТС в процессе эксплуатации, а также информация о продолжительности восстановления наиболее характерных для СТС отказов.

В процессе регулирования качества оборудования оцениваются его качественные и количественные показатели надежности. Первая группа показателей определяется с применением методики прогнозирования технического состояния СТС, разработанной с учетом основных положений корреляционного анализа, ковариационного анализа, теории геометрической вероятности, а также стохастического факторного анализа.

Результатом становятся: ожидаемое время появления отказа, вероятность появления отказа (а следовательно вероятность безотказной работы) и текущий коэффициент готовности оборудования к работе. На основании полученных результатов регулирование качества оборудования осуществляется с применением следующих методов: регулирование содержания и периодичности проведения ТОР, ППР и ДК, что позволяет корректировать остаточный ресурс оборудования, общий уровень его надежности, а также формировать график его вывода из эксплуатации без доведения до состояния предельного износа.

Таким образом происходит регулирование жизненного цикла оборудования на стадии его эксплуатации с использованием в качестве инструмента регулирования мероприятий, осуществляемых непосредственно на упомянутой стадии эксплуатации.

Вторая группа показателей формируется с применением методики прогнозирования технического состояния ТС, разработанной с учетом основных положений теории Марковских процессов, экономического дисконтирования и статистического анализа. Результатом становится определение аппроксимированного значения интенсивности отказов, времени появления отказов и плотности распределения отказов.

На основании полученных результатов регулирование качества оборудования осуществляется с применением следующих методов: регулирование объемов и сроков проведения плановой, повторной и внеплановой инспекции производства. Таким образом, происходит регулирование жизненного цикла оборудования на стадии его эксплуатации с использованием в качестве инструмента регулирования мероприятий, осуществляемых на стадии его изготовления.

Кроме того, статистическая информация по состоянию оборудования в процессе эксплуатации используется для разработки плана организационно-технических и научно-исследовательских мероприятий, направленных на совершенствование технологий производства оборудования, а так же разработку модернизированных и принципиально новых образцов, для их дальнейшей эксплуатации в системах трубопроводного транспорта.

В результате применения методики оценки условий и вероятности появления заводского брака оборудования, разработанной с учетом основных положений методов линейного и динамического программирования и корреляционно-регрессионного анализа определяются: основные факторы, влияющие на появление заводского брака, а также вероятность появления скрытого заводского брака.

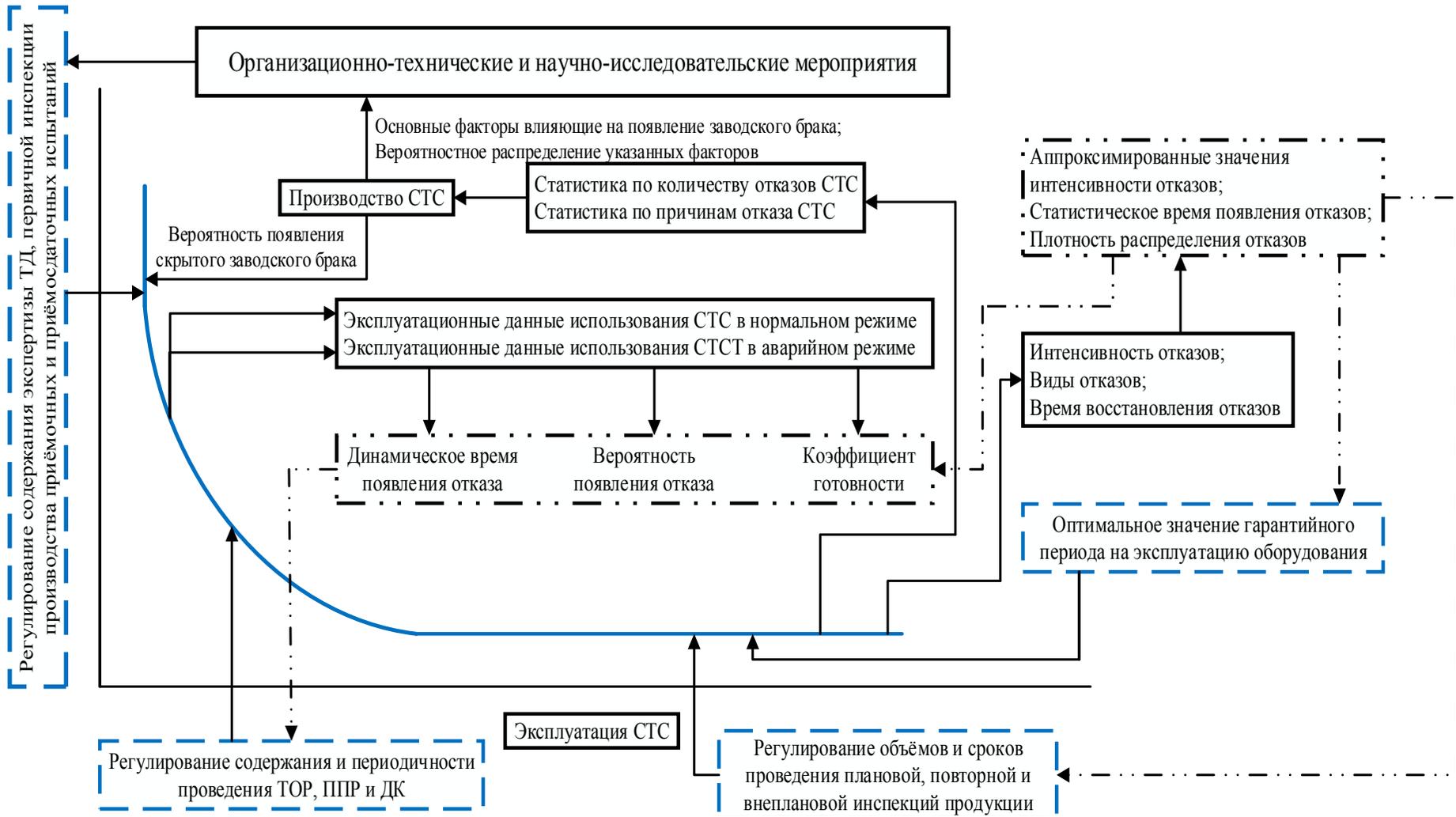


Рисунок 12 – Методология управления качеством оборудования на всех интервалах его жизненного цикла

На основании полученных результатов формируется план по техническому совершенствованию оборудования, основанный на регулировании содержания экспертизы ТД, первичной инспекции производства, а также приемочных и приемосдаточных испытаний. Таким образом, осуществляется регулирование жизненного цикла оборудования на стадии его производства с использованием в качестве инструмента регулирования мероприятий, осуществляемых непосредственно на упомянутой стадии производства СТС.

В рамках **шестой главы** была проведена апробация разработанного методологического аппарата; сформированы основные нормативные программные документы научно-технического развития нефтегазовых компаний на примере ПАО «Транснефть»; а также проведена оценка экономической эффективности применения разработанной методологии, на примере основных фондов ПАО «Транснефть».

Апробации были подвергнуты пять основных математических моделей: корреляционно-ковариационная математическая модель по прогнозированию появления отказов СТС; математическая модель по определению вероятности появления отказов СТС, вероятности безотказной работы СТС, коэффициента готовности СТС к работе и ожидаемого времени появления отказа СТС; математическая модель по определению начальной наработки оборудования характерной для зоны устойчивой значений интенсивностей отказов; математическая модель по определению времени наступления отдельных видов отказов СТС. Все перечисленные выше математические модели удовлетворяют приемочным критериям, разработанным в рамках программы проведения апробации, что подтвердило объективность их применения при проведении инженерных расчетов. В соответствии с вышесказанным, был сделан вывод о том, что методология управления качеством оборудования обладает необходимой степенью точности для ее дальнейшего использования на практике.

Также был сформирован ряд нормативных программных документов научно-технического развития нефтегазовых компаний (на примере ПАО «Транснефть»), позволяющих решить сформированную народнохозяйственную проблему. В их число вошли: научно-исследовательские работы в количестве 8 штук, опытно-конструкторские работы в количестве 4 штук, общие технические требования в количестве 18 штук, ГОСТ и ГОСТ Р в количестве 12 штук (более подробный список приведен в описании практической значимости работы).

Кроме того, в рамках данной главы, был проведен анализ экономической эффективности внедрения методологии управления качеством оборудования на основных фондах ПАО «Транснефть». В качестве объекта экономического анализа было принято площадочное оборудование насосных станций, а именно магистральные насосы серии НМ. При этом экономическая эффективность от внедрения методологии обеспечивается в результате:

- сокращения затрат электроэнергии на пуск насосных агрегатов, вызванных их внеплановыми остановками, в ходе сокращения общего количества внеплановых остановок магистральных насосов.

- сокращения финансовых потерь на восстановление работоспособного состояния магистральных насосов, в ходе сокращения их общего количества отказов

(здесь в качестве допущения принимается, что каждый отказ магистрального насоса сопровождается проведением текущего либо среднего ремонта).

– увеличения производительности трубопроводных систем, в ходе сокращения внепланового простоя насосных агрегатов.

В качестве основных показателей оценки экономической эффективности использовались:

- чистый дисконтированный доход;
- индекс доходности;
- срок окупаемости;
- внутренняя норма доходности.

Стоимость разработки, внедрения и обеспечения программно-технических комплексов, информационных баз данных, а также технических средств, направленных на реализацию методики по управлению качеством оборудования, в рамках данной работы была оценена в 25 миллиардов рублей. При этом экономический эффект от внедрения разработанной методологии, исключительно на примере магистральных насосов серии НМ по ПАО «Транснефть» составил:

- чистый дисконтированный доход: 7843,74 миллионов рублей в течение семи лет применения методологии;
- индекс доходности проекта 1,31 %;
- срок окупаемости проекта 4,82 года;
- внутренняя норма доходности 0,197 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ основных фондов компаний трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, показал, что наиболее полной выборкой статистической информации о возможных состояниях в процессе эксплуатации и условиях производства обладают следующие сложные технические системы: магистральные и подпорные насосные агрегаты, оборудование резервуарного парка и узлы учета нефти и нефтепродуктов. При этом использование в качестве объекта для разработки основных положений методологии управления качеством оборудования магистрального насосного агрегата позволило уменьшить системную погрешность сформированного методологического аппарата, в результате обеспечения наиболее репрезентативной выборки исходных данных.

2. В результате доказательства соответствия свойств процессов зарождения и развития дефектов, приводящих к отказам оборудования, основным положениям теории Марковских процессов, аргументировано применение мероприятий по прогнозированию его технического состояния как наиболее эффективного исследовательского способа управления качеством СТС. Таким образом, обеспечена научная обоснованность прогнозирования технического состояния объекта исследования на временном интервале $i+1$, с использованием информации об его техническом состоянии на момент осуществления анализа i , что позволило применить фундаментальные методы математического анализа для функционального формирования методики управления качеством оборудования.

3. Разработаны методики управления качеством и надежностью оборудования нефтеперекачивающих станций на этапе его производства и эксплуатации, заключающиеся в прогнозировании базовых характеристик возможного потока отказов и текущих показателей надежности СТС, а также определении основных факторов и вероятности появления заводского брака оборудования. В работе были определены граничные значения применения методики для магистральных насосов типа НМ и синхронных электродвигателей в количестве генеральной совокупности в 128 единиц по соответствующим интенсивностям отказов: $0,001 \frac{1}{\text{мес}}$ и $0,002 \frac{1}{\text{мес}}$.

4. Характеристики оборудования нефтеперекачивающих агрегатов интегрированы в методики управления надежностью в виде исходных данных к математическим моделям для осуществления возможности прогнозирования технического состояния СТС. При этом были установлены наиболее чувствительные к изменению общей надежности нефтеперекачивающих агрегатов эксплуатационные характеристики:

- температура упорного подшипника магистрального насоса;
- температура заднего подшипника (скольжения) насоса;
- горизонтальная вибрация переднего подшипника электродвигателя;
- расход масла к переднему подшипнику электродвигателя;
- температура заднего подшипника электродвигателя.

В методику управления качеством оборудования интегрирована статистическая информация о количестве отказов СТС, их причинах и времени появления (отнесенного к моменту ввода оборудования в эксплуатацию), используемая в математических моделях по определению вероятности и факторов, влияющих на появление скрытых заводских дефектов.

5. Разработана математическая модель по детализации жизненного цикла оборудования нефтеперекачивающих станций, конечным результатом которой становится формирование графика жизненного цикла с использованием в качестве базовых координат времени наступления наиболее характерных видов отказов и времени проведения работ по поддержанию работоспособного состояния СТС.

6. Сформирована методология управления качеством оборудования нефтеперекачивающих станций на всех интервалах его жизненного цикла, позволяющая получить следующий технический эффект:

- обеспечить возможность прогнозирования технического состояния оборудования с применением установленных критериев оценки уровня его работоспособности с погрешностью не превышающей 5 %;

- определить оптимальный для текущих условий эксплуатации и производства оборудования гарантийный период. Для магистральных насосов и синхронных электродвигателей данные значения составили соответственно 40 и 36 месяцев, что превышает средние значения, заявленные производителями на 31,3 %, 8 %;

- прогнозировать количество отказов оборудования, характерного для СТС в реальных условиях эксплуатации, что позволяет статистически отобразить процессы его естественного износа. Для магистральных насосов типа НМ вариативный разброс количества отказов, характеризующий годовое количество

отказов для выборки в 180 технологических единиц в процессе естественного износа находится в диапазоне [2; 5].

Основные положения и результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК России

1. Аралов, О.В. Анализ методов и подходов к оценке надежности при прогнозировании отказов оборудования магистрального трубопроводного транспорта / О.В. Аралов, И.В. Буянов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 6. – С. 104-114.

2. Аралов, О.В. Анализ системы стандартизации в области измерения количества нефти и нефтепродуктов / О.В. Аралов, А.С. Саванин, И.Н. Кацал // Нефть, газ и бизнес. – 2017. – № 2. – С. 34-39.

3. Аралов, О.В. Достижения и перспективы развития ООО "НИИ Транснефть" / О.В. Аралов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 4. – С. 14-23.

4. Аралов, О.В. Исследование методов расчета кинематической вязкости нефти в магистральном нефтепроводе / О.В. Аралов, И.В. Буянов, А.В. Саванин, Е.И. Иорданский // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 5. – С. 97-105.

5. Аралов, О.В. Коррозионная активность растворов пенообразователей / О.В. Аралов, Д.А. Неганов, П.И. Шотер, С.А. Половков, П.П. Ревин, А.И. Красовский // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 2. – С. 88-91.

6. Аралов, О.В. Методология совершенствования национальных и межгосударственных стандартов в области измерений количества нефти и нефтепродуктов и контроля качества нефти и нефтепродуктов / О.В. Аралов, А.С. Саванин // Издательство ОГУ имени И.С. Тургенева. – 2017. – № 1. – С. 127-132.

7. Аралов, О.В. Основные направления развития деятельности по обеспечению единства измерений в области внутритрубного диагностирования / О.В. Аралов, И.Н. Кацал, Ю.В. Лисин, И.В. Буянов, М.В. Гужарин, С.М. Воробьёв // Нефть, газ и бизнес. – 2017. – № 4. – С. 3-9.

8. Аралов, О.В. Основные положения разработки методологии оптимизации и параметров жизненного цикла технологического оборудования / О.В. Аралов, И.В. Буянов, Б.Н. Мастобаев, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // ООО «Транснефть - Медиа». – 2016. – № 6 – С. 23–29.

9. Аралов, О.В. Отраслевая система оценки соответствия оборудования и материалов, применяемых в ОАО "АК "Транснефть" / О.В. Аралов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 2. – С. 24-27.

10. Аралов, О.В. Оценка технического состояния оборудования АСУТП на основе измеряемых параметров технологического процесса / О.В. Аралов,

Г.Е. Долбин, В.В. Кузьмин, В.А. Кузьмичек // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 6. – С. 93-97.

11. Аралов, О.В. Повышение надежности оборудования магистральных нефтепроводов / О.В. Аралов, Ю.В. Лисин, Я.М. Фриндлянд // Научный журнал: Стандарты и качество №8, 2015. – С. 36-40.

12. Аралов, О. В. Практика государственного регулирования деятельности в сфере трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов в Канаде / О. В. Аралов, В.И. Сагылин, И.А. Гулиев, Ю.В. Соловова, Ю.В. Лисин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4.– С. 106-112.

13. Аралов, О.В. Применение метода количественного прогнозирования отказов оборудования на примере отраслевой системы оценки соответствия ПАО «Транснефть» / О.В. Аралов, Ю.В. Лисин // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 106-109.

14. Аралов, О.В. Развитие системы оценки соответствия качества закупаемой продукции, выполняемых работ и оказываемых услуг в системе ОАО "АК "Транснефть" / О.В. Аралов, В.И. Федота, Д.А. Жижин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 4. – С. 64-72.

15. Аралов, О.В. Разработка математической модели оценки финансовой реализуемости плана ОКР по созданию сложных технических систем / О.В. Аралов Е.В. Сайко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 3. – С. 36-41.

16. Аралов, О.В. Разработка математической модели оценки финансовой реализуемости плана опытно-конструкционных работ по созданию сложных технических систем / Ю.В. Лисин, О.В. Аралов, Б.Н. Мастобаев, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 3 – С. 17-23.

17. Аралов, О.В. Разработка тренажера системы измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов / О.В. Аралов, Ю.В. Лисин, А.С. Саванин // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 7. – С. 24-27.

18. Аралов, О.В. Создание отраслевой системы аккредитации в ОАО "АК "Транснефть" / О.В. Аралов, А.М. Ефремов, И.В. Буянов, Д.А. Жижин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 4.– С. 90-97.

19. Аралов, О.В. Сокращение пределов допускаемой относительной погрешности косвенного метода динамических измерений массы нефти и нефтепродуктов / О.В. Аралов, Ю.В. Лисин, А.С. Саванин // Законодательная и прикладная метрология. – 2016. – № 2.– С. 17-20.

Монография

1. Аралов, О.В. Методологические основы управления качеством продукции с применением механизма оценки соответствия в магистральном трубопроводном транспорте / О.В. Аралов, Р.Н. Бахтизин, Ю.В. Лисин, Б.Н. Мастобаев. – СПб.: Недра, 2017.–288с.

Патенты

1. Патент РФ № 2016617033, 18.03.2016. Аралов О.В., Кацал И.Н., Лисин Ю.В., Естин М.П., Чувииков Н.В., Башкин А.С., Хусаинов Р.Р., Буклаев Н.Г., Кислица Е.А. Тренажер системы обработки информации системы измерения количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов // Патент России № 2016617033. 2016.
2. Патент РФ № 2014616331, 05.06.2014. Лисин Ю.В., Аралов .О.В., Буянов И.В., Федотов П.В. Формирование заключения о соответствии продукции, закупаемой ОАО «АК «Транснефть» // Патент России № 2014616331. 2014.
3. Патент РФ № 2014620721, 01.04.2014. Лисин Ю.В., Аралов .О.В., Ревель-Муроз П.А., Буянов И.В. База данных Реестра основных видов продукции, закупаемой ОАО «АК «Транснефть» // Патент России № 2014620721. 2014.
4. Патент РФ № 2016617992, 19.06.2016. Лисин Ю.В., Аралов .О.В., Комаров А.И., Сайко Е.В. Информационная система формирования и ведения базы отзывов по поставщикам материально-технических ресурсов и донесений о производителях продукции// Патент России № 2016617992. 2016.
5. Патент РФ № 2014615228, 01.04.2014. Лисин Ю.В., Юзефович А.В., Аралов О.В., Буянов И.В., Федотов П.В. Формирование и ведение Реестра основных видов продукции, закупаемой ОАО «АК «Транснефть». Подсистема ведения // Патент России № 2014615228. 2014.

Публикации в других изданиях

1. Аралов, О. В. Анализ и исследование динамики структуры цены на НТП в задаче управления разработками ТС / О.В. Аралов, А.В. Бабкин // СПб. – 1997. – С. 15.
2. Аралов, О.В. Анализ методов и современное состояние решения задачи оптимизации плана ОКР по технике связи / О.В. Аралов, А.В. Бабкин // СПб. – 1997. – С. 28.
3. Аралов, О. В. Анализ методологии и системы управления развитием вооружения и военной техники / О.В. Аралов // Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции, актуальные проблемы защиты и безопасности, бронетанковая техника и вооружение. - 2011. – С. 32-33.
4. Аралов, О.В. Анализ организационно-правовых форм проведения НИОКР и источников их финансирования за рубежом и в России / О.В. Аралов, А.В. Бабкин, С.П. Еременко // СПб. – 1997. – С. 15.
5. Аралов, О.В. Анализ подходов к определению эффективности функционирования средств и комплексов связи при внедрении новых информационных технологий / О.В. Аралов, В.В. Куприянов, Е.А. Рябинов // Сборник научно-техн. трудов 34 ВНК ВАС. – 1998. – С.184-186.
6. Аралов, О.В. Анализ состава систем измерений количества нефти и нефтепродуктов / О.В. Аралов, И.В. Буянов, А.С. Саванин // Международная научно-техническая конференция: Экономика правового менеджмента, современные проблемы и тенденции развития. – 2015. – №9. – С. 98-103.

7. Аралов, О. В. Анализ факторов, оказывающих влияние на процесс перевооружения СВС при создании новой техники связи / О.В. Аралов, А.В. Бабкин // СПб. – 1997. – С. 14.
8. Аралов, О.В. Задача оптимизации плана ОКР по ВТС в условиях рынка / О.В. Аралов // Сборник материалов 33 НТК ВАС. Часть 1. – 1996. – С. 241-243.
9. Аралов, О.В. Импортозамещение основных видов продукции и оценка соответствия производителей и оборудования для трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов / О.В. Аралов // X Международная конференция «нефтегазстандарт». – 2015. – С. 26-29.
10. Аралов, О.В. Исследование влияния надежности ВТС на величину эксплуатационных затрат / О.В. Аралов, В.В. Куприянов, Е.А. Рябинов // Сборник научно-техн. трудов 34 ВНК ВАС. – 1998. – С.181-183.
11. Аралов, О.В. Исследование вопросов ценообразования на продукцию (работы, услуги) в условиях рыночной экономики / О.В. Аралов, А.И. Могильный, В.Р. Иванов // СПб.: ВУС.– 1999. – № 1.– С. 34.
12. Аралов, О.В. Исследование структуры затрат на эксплуатацию средств и комплексов связи и особенности их распределения / О.В. Аралов, В.В. Куприянов, Е.А. Рябинов // Сборник научно-техн. трудов 34 ВНК ВАС. – 1998. – С.179-180.
13. Аралов, О.В. Корреляционная модель прогнозирования отказов нефтеперекачивающих агрегатов / О.В. Аралов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде: сб. тезисов - Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2016.– С. 17-19.
14. Аралов, О.В. Методика военно-экономического обоснования принимаемых решений при создании и использовании систем и средств военной связи / О.В. Аралов, В.В. Куприянов, А.В. Бабкин // Труды академии. Научно-технический сборник. – 1996. – № 69. – С. 31-32.
15. Аралов, О.В. Методика определения затрат на создание и эксплуатацию полевых СВС / О.В. Аралов, А.В. Бабкин, В.В. Куприянов // Труды академии. Научно-технический сборник. – 1996. – № 59. – С. 32-34.
16. Аралов, О.В. Методика определения затрат на эксплуатацию образцов ВТС и ТС ДН / О.В. Аралов, А.В. Бабкин, Е.А. Рябинов // СПб. – 1997. С. 118.
17. Аралов, О. В. Методический аппарат по прогнозной оценке аварийности СИКН / О.В. Аралов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде: сб. тезисов - Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2016. – С. 20-22.
18. Аралов, О.В. Методологические основы управления качеством продукции с применением механизма оценки соответствия в магистральном трубопроводном транспорте / О.В. Аралов, Р.Н Бахтизин, Ю.В. Лисин, Б.Н. Мастобаев. – СПб.: Недра, 2017. – 288 с.
19. Аралов, О.В. Механизм управления качеством продукции в системе ОАО "АК "Транснефть" / О.В. Аралов, Р.С. Гаспарянц, Ю.Н. Пашуков, Г.Ю. Чуркин, А.П. Петров // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2006. – №4. – С. 39-47.

20. Аралов, О.В. Обоснование задачи оптимизации плана ОКР по ТС / О.В. Аралов, А.В. Бабкин // СПб. – 1997. – С. 20.

21. Аралов, О.В. Обоснование инвестиционной стратегии при разработке новой техники связи / О.В. Аралов, А.В. Бабкин // Материалы Всероссийской научной конференции, секция 5, СПб.: СПбГУ. – 1997. – С. 18-20.

22. Аралов, О. В. Определение оптимального времени квалификационных испытаний насосно-силового оборудования / О.В. Аралов, И.В. Буянов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // Трубопроводный транспорт – 2017. –С. 12-14.

23. Аралов, О.В. Основные положения разработки методологии оптимизации параметров жизненного цикла средств и комплексов связи / О.В. Аралов, Г.В. Долинин, В.В. Степанов // Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции, актуальные проблемы защиты и безопасности, бронетанковая техника и вооружение. – 2011. – С. 273-283.

24. Аралов, О.В. Особенности формирования плана ОКР при использовании новых сетевых технологий / О.В. Аралов // Материалы 34 ВНТК ВАС, СПб. – 1998.– С. 42.

25. Аралов, О.В. Оценка соответствия оборудования, применяемого на объектах магистральных нефтепроводов ОАО "АК "Транснефть"/ О.В. Аралов // Международная научно-техническая конференция УГНТУ. – 2015. – С. 32.

26. Аралов, О. В. Оценка соответствия продукции в России и за рубежом / О.В. Аралов, И.В. Буянов // Трубопроводный транспорт – 2017. – С. 10-12.

27. Аралов, О.В. Оценка финансовой реализуемости проекта плана ОКР по технике связи / О.В. Аралов, Г.В. Долинин, В.В. Степанов // Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции, актуальные проблемы защиты и безопасности, бронетанковая техника и вооружение. – 2011. – С. 290-299.

28. Аралов, О. В. Проблемы конкурсного размещения заказов на разработку комплексов связи при внедрении новых сетевых технологий / О.В. Аралов // Материалы 34 ВНТК ВАС, СПб. – 1998. – С. 45.

29. Аралов, О.В. Проблемы оптимизации плана ОКР по технике связи / О.В. Аралов // СПб. – 1997. – С. 17.

30. Аралов, О. В. Проблемы разработки новой техники и пути их решения / О.В. Аралов, А.В. Бабкин // Тезисы докладов 1-й Городской НПК военных учебных и научных учрежд-й СПб, Часть 1, секция 5. – 1996. – С. 203-204.

31. Аралов, О.В. Разработка математической модели задачи оценки финансовой реализуемости проекта плана ОКР / О.В. Аралов // Вестник молодых ученых. Экон. серия "Новая экономика". – 1999. – С. 47-48.

32. Аралов, О.В. Разработка математической модели оптимизации параметров проекта плана ОКР группы однородных комплексов средств связи / О.В. Аралов // Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции, актуальные проблемы защиты и безопасности, бронетанковая техника и вооружение. – 2011. – С. 103.

33. Аралов, О.В. Разработка математической модели оценки финансовой реализации инновационных проектов государственного заказчика в системе стратегического менеджмента / О.В. Аралов // Сборник научных трудов ВУС

"Системы связи и АСУ ВС РФ: экономические проблемы развития в современных условиях". – 1999. – С. 36-54.

34. Аралов, О.В. Разработка методологического аппарата по определению вероятности появления дефекта оборудования при его производстве на основе метода линейно-динамического программирования / О.В. Аралов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // Трубопроводный транспорт. – 2016. – С. 12-14.

35. Аралов, О.В. Разработка методологического аппарата по определению характера возникновения дефекта / О.В. Аралов, Н.В. Бережанский, Д.В. Былинкин // Трубопроводный транспорт. – 2016. – С. 9-11.

36. Аралов, О.В. Совершенствование измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов при их транспортировке по системе магистральных трубопроводов / О.В. Аралов, А.С. Саванин, И.В. Буянов, С.И. Воробьев // IV-ая международная метрологическая конференция. – 2016. – С. 18-19.

37. Методика оптимизации плана ОКР по технике связи при программном планировании: отчёт о НИР / Аралов О.В. – СПб.: ВАС, 1998. – 107 с.

38. Оптимальное управление разработками ТС при программном планировании: отчет о НИР / Аралов О.В. – СПб.: ВАС, 1998. – 95 с.