

На правах рукописи



Егоров Дмитрий Ильич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ
НОРМАТИВНО-ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2020

Работа выполнена на кафедре «Пожарная и промышленная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Шурайц Александр Лазаревич

Официальные оппоненты: Самигулин Гафур Халафович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» / кафедра пожарной безопасности технологических процессов и производств, профессор

Бажайкин Станислав Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
НТЦ ООО «НИИ Транснефть», главный научный сотрудник

Ведущая организация ООО «Центр исследования экстремальных ситуаций» (г. Москва)

Защита состоится «12» марта 2021 года в 14.00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современной наукой уделяется большое внимание обеспечению промышленной безопасности стальных трубопроводов для перекачки природного газа, нефти и нефтепродуктов (далее – газонефтепроводов). Основным инструментом количественной оценки безопасности является расчет рисков, а также показателей надежности, особый интерес вызывают критерии безотказности и долговечности.

Это, в частности, объясняется тем, какие последствия могут возникать при неправильной эксплуатации трубопровода, по которому осуществляется транспортировка одних из наиболее опасных видов сырья – нефти, нефтепродуктов и газа.

Известные причины, способствующие образованию аварийной ситуации на трубопроводе, можно разделить на несколько категорий:

- воздействие окружающего пространства, т.е. климатические, геологические и иные подобные процессы, которые не зависят от технической составляющей конструктивных особенностей трубопровода, состояния (его изменения) перекачиваемого сырья, а также от так называемого человеческого фактора. Выразиться такое воздействие может оползневыми процессами, курумами, солифлюкцией, выпадением осадков в экстремальных величинах и т. п.;
- воздействие состояния перекачиваемого сырья, которое может быть выражено нестабильностью показателей его температуры, массы, давления и т. п.;
- воздействие человеческого фактора, выраженное чаще всего ошибками при проведении различных видов работ, нарушением эксплуатационных норм;
- воздействие самих конструктивных элементов трубопровода по таким причинам как некачественно произведенное изделие, объективно происходящие изменения в структуре отдельных элементов трубопровода, сложности определенных участков магистрали и др.

По всей совокупности названных причин, независимо от того, какая именно из них выступает детерминирующим аварийную ситуацию фактором, общим являются те негативные последствия, которые могут возникать как для окружающей среды, лиц, осуществляющих эксплуатацию трубопровода, так и

для самого трубопровода и проходящего по нему сырья. В этой связи, в научно-исследовательской среде, небезосновательно наиболее пристальное внимание уделяется ресурсу безопасной эксплуатации трубопровода.

Известно, что криволинейные участки газонефтепроводов с элементами поворота, так называемые кривые участки, являются наиболее напряженными. Работа таких элементов трубопроводов в условиях повторно-статического нагружения из-за изменения технологического режима перекачки или перепада температур, пульсации давления от компрессора или прохождения по системе двухфазной среды (особенно, в пробковом режиме) зачастую может сопровождаться вибрацией. Возмущение газового потока за счет переходных процессов, автоколебаний в местах взаимодействия стационарного потока с конструкциями элементов поворота, отводов, арматуры, тройников также объясняют происхождение характерных механических колебаний.

Оценка ресурса безопасной эксплуатации кривых участков, которые работают в условиях нестационарного нагружения внутренним давлением и вибраций, должна учитывать явление усталости при двухчастотном нагружении, так как иначе невозможно принимать обоснованные решения по недопущению их разрушений. К двухчастотному нагружению относятся сложные режимы циклического нагружения, характер изменения которых во времени определяется сложением одновременно действующих, периодических нагрузок с различными частотами и формами циклов: основная низкочастотная составляющая повторно-статической нагрузки и дополнительная высокочастотная составляющая нагрузки, которая изменяется по гармоническому закону.

Применение нормативного подхода, где проектные решения направлены на обеспечение гарантии безопасности в условиях заложенных запасов прочности и нагрузки затрудняется в связи с использованием новых технологических процессов и конструктивных решений, ужесточением эксплуатационных нагрузок, а также других аналогичных факторов. Применение нормативно-вероятностного подхода позволяет нормировать заданный уровень вероятностного показателя надежности (безотказности), который впоследствии можно контролировать и использовать в качестве основы обеспечения гарантий безопасной эксплуатации объекта.

Для решения задачи оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов при сложных режимах нагружения на основе нормативно-

вероятностного подхода необходима разработка методов по заданной вероятности безотказной работы.

Таким образом, разработка методов оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов при сложных режимах нагружения на основе нормативно-вероятностного подхода является актуальной задачей, направленной на обеспечение промышленной безопасности.

Степень разработанности

Вопросы, связанные с обеспечением безопасности газонефтепроводов, рассмотрены в трудах А. Г. Гумерова, О. М. Иванцова, А. Л. Шурайца, П. П. Бородавкина, М. Х. Султанова, В. В. Харионовского, О. В. Аралова и других. Оценка и нормирование ресурса при сложных режимах нагружения по критерию риска, в частности по характеристике безопасности (заданной вероятности безотказной работы), несмотря на большой вклад многих исследователей, является не до конца решенной задачей.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль), а именно пункту 13 области исследований в части разработки методов оценки и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации технических устройств сложных технических систем опасных производственных объектов.

Целью диссертационной работы является обеспечение промышленной безопасности газонефтепроводов при сложных режимах нагружения и критичности ресурса их эксплуатации.

Задачи исследования:

- анализ состояния вопроса оценки ресурса безопасной эксплуатации криволинейных участков газонефтепроводов;
- экспериментальные исследования влияния двухчастотного нагружения на ресурс участков газонефтепроводов;
- разработка расчетных методов оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы;
- разработка методики оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы.

Объектом исследования данной работы являются криволинейные участки стальных трубопроводов для перекачки природного газа, нефти и нефтепродуктов.

Научная новизна:

1 Получена критериальная зависимость ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов при их двухчастотном нагружении от величины показателя запаса работоспособности.

2 Получены зависимости, позволяющие произвести количественную оценку ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов при двухчастотном нагружении по заданной вероятности безотказной работы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что разработана математическая модель ресурса участков газонефтепроводов при их двухчастотном нагружении, которая дала результаты количественной оценки ресурса и вероятности безотказной работы.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении стандарта организации СТО 03321549-061-2018 АО «Гипрониигаз» «Методика расчета ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов». Положения, указанные в стандарте, были использованы АО «Газпром газораспределение Ленинградская область» при техническом перевооружении технологического оборудования на территории ГРС «Кириши» Ленинградской области.

Методология и методы исследования

В ходе диссертационного исследования использовались методы теории надежности, вероятности и математической статистики, упругости, пластичности, механики разрушения, методы испытаний и контроля технического состояния стальных трубопроводов.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований и оценки ресурса образцов трубных сталей при их двухчастотном нагружении;
- расчетные методы оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы на базе данных измерительного и допускового контроля;

– научно-методическое обеспечение оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов при двухчастотном нагружении по заданной вероятности безотказной работы.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов, научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в данном исследовании, подтверждаются:

– совпадением результатов моделирования данным, полученным на основе ретроспективного анализа показателей безотказности и долговечности газонефтепроводов;

– сходимостью расчетных оценок ресурса с результатами экспериментальных исследований на образцах трубных сталей;

– воспроизводимостью результатов исследований в различных условиях эксплуатации категоризованных участков газонефтепроводов;

– согласованием полученных результатов с ранее опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на XV Международной научно-практической конференции «Энергоэффективность. Проблемы и решения» (Уфа, 2015);

– семинарах Центра «Надежность и безопасность эксплуатации объектов магистральных трубопроводов и энергосбережения» ГУП «Институт проблем транспорта энергоресурсов» (Уфа, 2014-2015).

– международных научно-практических конференциях «Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газопитания» (Саратов, 2017-2019).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 12 научных трудах, в том числе в 4 изданиях, рецензируемых ВАК Минобрнауки России, а также в 1 рецензируемом научном издании, входящем в международные реферативные базы данных.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 108 наименований. Работа изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц, 16 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, определены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе приводится анализ состояния вопроса оценки ресурса безопасной эксплуатации криволинейных участков газонефтепроводов.

На основе существующих литературных источников раскрыто содержание методов оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов. Сюда входят методы физико-технического анализа («физики отказов») и вероятностно-статистические методы. Они нацелены на установление закономерностей возникновения отказов, восстановление работоспособного состояния конструктивных элементов и объектов в целом, изучение нагрузок, внешних и внутренних воздействий, на разработку методов оценки надежности и прогнозирования отказов. Важно то, что разработанные методы оценки ресурса конструктивных элементов и объектов в целом, обладающих заданными показателями надежности, в частности, безотказной работы, направлены на решение задач обеспечения надежности и промышленной безопасности газонефтепроводов.

Анализ нормативной базы функционирования газонефтепроводов показал, что она нацелена на обеспечение требуемого технологического режима перекачки и безопасную эксплуатацию газонефтепроводов на основе диагностики и ремонта по фактическому техническому состоянию. Важным составляющим нормативной базы является установление аналитических зависимостей между показателями технологических режимов работы, надежности и безопасности газонефтепроводов.

Установлено, что при применении норм, в расчетах на прочность промысловых и магистральных газонефтепроводов, существующие поправочные коэффициенты не отражают относящиеся к первому предельному состоянию дополнительные факторы, оказывающие влияние на ресурс безопасной эксплуатации. Такие факторы как агрессивная среда, концентрация напряжений, снижение сопротивляемости к деформационному старению металла на дефектных местах, малоцикловое нагружение и вибрация элементов трубопровода, влияющие на несущую способность и ресурс участков газонефтепроводов, не компенсируются установленными коэффициентами надежности по материалу и нагрузке.

В связи с этим существенный интерес представляют аналитические зависимости для расчетной оценки ресурса безопасной эксплуатации в сложных условиях. Под сложными условиями подразумевается повторно-статическое нагружение внутренним давлением трубопровода и проявление высокочастотного воздействия на трубопровод в результате вибрации различного происхождения.

Также установлено, что в настоящее время ресурс безопасной эксплуатации газонефтепроводов определяется на основе нормативного подхода и выражается в виде технических требований к изоляции трубной стали, сварным соединениям и трубопроводной конструкции в целом. В работе показана потребность нормативно-вероятностного подхода к оценке ресурса участков газонефтепроводов, позволяющего установить взаимосвязь ресурса и характеристики безотказности в количественном выражении.

Актуальной является разработка методики оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов при двухчастотном нагружении по заданной вероятности безотказной работы.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния двухчастотного нагружения на ресурс участков газонефтепроводов. При двухчастотном нагружении участков газонефтепроводов создаются условия ускоренного накопления поврежденности в основном металле и сварных соединениях, в особенности, на дефектных участках. Важно было количественно оценить показатель безотказности при двухчастотном нагружении участков газонефтепроводов. Исследование было нацелено на установление аналитической зависимости показателей безотказности и долговечности газонефтепроводов.

Для решения задачи оценки влияния двухчастотного нагружения на циклическую усталость металла участков газонефтепроводов проведены экспериментальные исследования на образцах размером 200*40*3 мм из углеродистой и низколегированной трубных сталей ВСтЗсп5 и 17Г1С соответственно. В активной части образцов выполнялись надрезы под углом 60°, создающие концентрацию напряжений при консольном изгибе.

Составлен план проведения эксперимента, где установлено: необходимое число экспериментов в пяти этапах и в каждом этапе по шесть образцов трубной стали; последовательность проведения эксперимента в пяти этапах испытаний образцов в условиях одночастотного и двухчастотного нагружений

образцов; математическая модель для описания экспериментов - формула В.И. Труфякова.

Учитывая, что при номинальных нагрузках в концентраторах напряжений образуются упругопластические деформации, а за пределами концентраторов напряжений деформации упругие, все эксперименты производились с постоянной амплитудой деформации.

Образцы испытывали консольным изгибом под углом α , где $\operatorname{tg}\alpha = 0,7$ с амплитудой 140 мм. За низкочастотную составляющую двухчастотной нагрузки был принят изгиб образца с частотой 0,017 Гц. В свою очередь, высокочастотная составляющая нагрузки, возбуждаемая электромеханической ударной установкой, накладывалась во время максимально возможного изгиба, возникающего за одну минуту (экстремумы низкочастотной нагрузки) и была охарактеризована частотой от 1,7 до 16 Гц.

Измерительный комплекс, использованный в качестве испытательного оборудования, состоял из следующих элементов:

- электронные регистраторы измерений;
- устройства осуществления контроля параметров нагружения (включает датчики коэрцитивной силы и магнитной анизотропии);
- блок для осуществления изгиба образцов;
- блок электромеханической ударной установки (функционирует в циклическом режиме, возбуждает составляющую высокочастотной нагрузки).

Построение калибровочных кривых, которые характеризуют взаимосвязь показателей механических напряжений (деформаций) с магнитными характеристиками, осуществлялось с использованием рычажного деформометра Гугенбергера.

На Рисунке 1 приведена структурная схема проведения экспериментальных исследований.

Для оценки долговечности плоских образцов при проведении испытаний была применена схема консольного изгиба. Для этого в состав нагружающего блока измерительного комплекса вошел соединенный по жесткой схеме со станиной и образцом 1 плоский консольный динамометр, на свободном конце которого и было закреплено описанное соединение. Эксцентрик 3 с шатуном 2 позволили осуществить необходимые перемещения нагруженного образца. Величина нагрузки менялась путем регулирования эксцентрика и замерялась при помощи деформометра Гугенбергера 4 и динамометра. Электромеханическая

циклическая ударная установка (блок 5) использовалась для цели возбуждения высокочастотной составляющей нагрузки. Датчики акустической эмиссии 8, магнитной анизотропии 6, коэрцитивной силы 7 были смонтированы прямо на образце. В блоке 9 производилась регистрация сигналов магнитной анизотропии и коэрцитивной силы. Коэрцитиметрический метод контроля (КМ) использовался в качестве дублирующего метода магнитной анизотропии (МА). Блок 10 осуществлял регистрацию сигналов акустической эмиссии (АЭ).

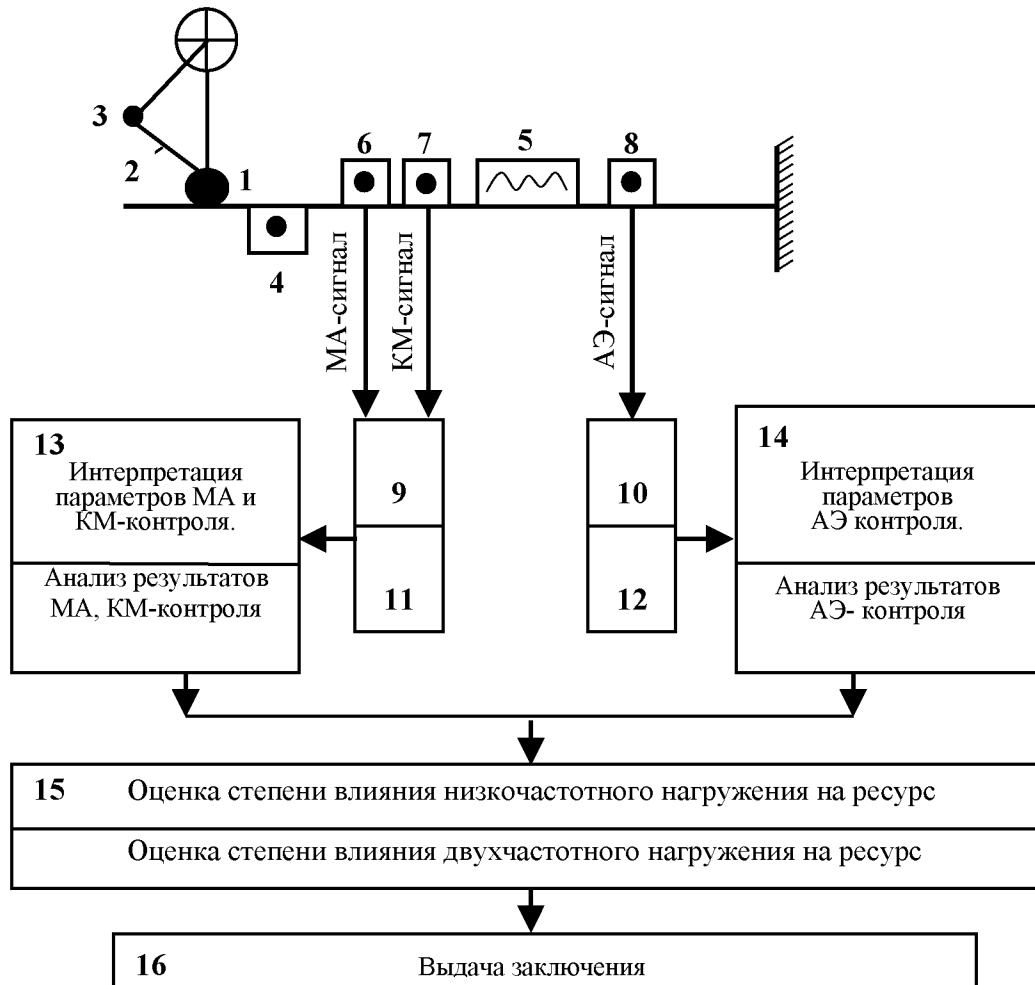


Рисунок 1 – Структурная схема проведения экспериментальных исследований по оценке ресурса образцов при низкочастотном и двухчастотном нагружениях

Сигналы активности акустической эмиссии и магнитной анизотропии записывались синхронно на самопишущем устройстве НЗ88-4П. При прочих равных условиях, испытательные эксперименты осуществлялись в воздухе. Интерпретация записи анализируемых параметров магнитной анизотропии (МА), коэрцитивной силы (КМ) и АЭ выполнялась в блоках 13 и 14. Анализу подлежали такие параметры, как амплитуда деформации металла A_q ,

активность АЭ-сигналов по амплитуде эмиссии в единицу времени A_3 и число импульсов АЭ, характеризующее скорость накопления заданного число эмиссии в единицу времени V_3 . Затем результаты измерений анализировались, выполнялась оценка степени влияния одночастотной и двухчастотной нагрузок на ресурс до разрушения образцов (блок 15), выдавалось заключение (блок 16).

Использование датчика акустической эмиссии совместно с регистратором сигналов АФ-15 во время испытаний обусловлено тем, что необходимо было осуществить наблюдение и контроль за кинетикой трещинообразования, происходящего на ранней стадии, поскольку образцы начинали разрушаться через развитие макро и микротрещин.

Алгоритм и результаты проведенных испытаний по образцам трубной стали ВСтЗсп5, являлись следующими:

1 Проверке на формирование консольного изгиба при частоте 0,017 Гц в отсутствие высокочастотной составляющей, были подвергнуты шесть образцов. Верхняя планка напряжения изгиба – 200 МПа (равносильно показателю магнитной анизотропии 450 мкА). Число произведенных изгибов – 420 циклов (до разрушения). Доверительный интервал, с заданной доверительной вероятностью – 0,9, составил +/- 30 циклов. Погрешность измерений – 7,1%.

2 Проверке на формирование консольного изгиба при частоте 0,017 Гц и напряжением изгиба - 200 МПа (450 мкА) с наложением на экстремумах низкочастотной составляющей высокочастотной составляющей 1,7 Гц были подвергнуты шесть образцов. Напряжение высокочастотной составляющей – 10 МПа (22,5 мкА). Число произведенных изгибов – 370 циклов (до разрушения). Доверительный интервал, с заданной доверительной вероятностью – 0,9, составил +/- 28 циклов. Погрешность измерений – 7,5%.

3 Аналогичные испытания шести образцов с наложением высокочастотной составляющей 1,7 Гц и напряжением 20 МПа (45 мкА). Число произведенных изгибов – 250 циклов (до разрушения). Доверительный интервал, с заданной доверительной вероятностью – 0,9 составил +/- 19 циклов. Погрешность – 7,6%.

4 Аналогичные испытания шести образцов с наложением на экстремумах низкочастотной составляющей высокочастотной составляющей 60 Гц. Напряжение высокочастотной составляющей – 10 МПа (22,5 мкА). Число произведенных изгибов – 340 циклов (до разрушения). Доверительный

интервал, с заданной доверительной вероятностью – 0,9, составил +/- 18 циклов. Погрешность – 5,3%.

5 Аналогичные испытания шести образцов с наложением высокочастотной составляющей 60 Гц и напряжением 20 МПа (45мкА). Число произведенных изгибов – 230 циклов (до разрушения). Доверительный интервал, с заданной доверительной вероятностью – 0,9, составил +/- 15 циклов. Погрешность – 6,5%.

Результаты активности и числа импульсов АЭ, амплитуды деформационного процесса во время осуществления консольного изгиба в отсутствие составляющей высокочастотного наложения и с наложением высокочастотной составляющей, наглядно продемонстрированы на Рисунке 2.

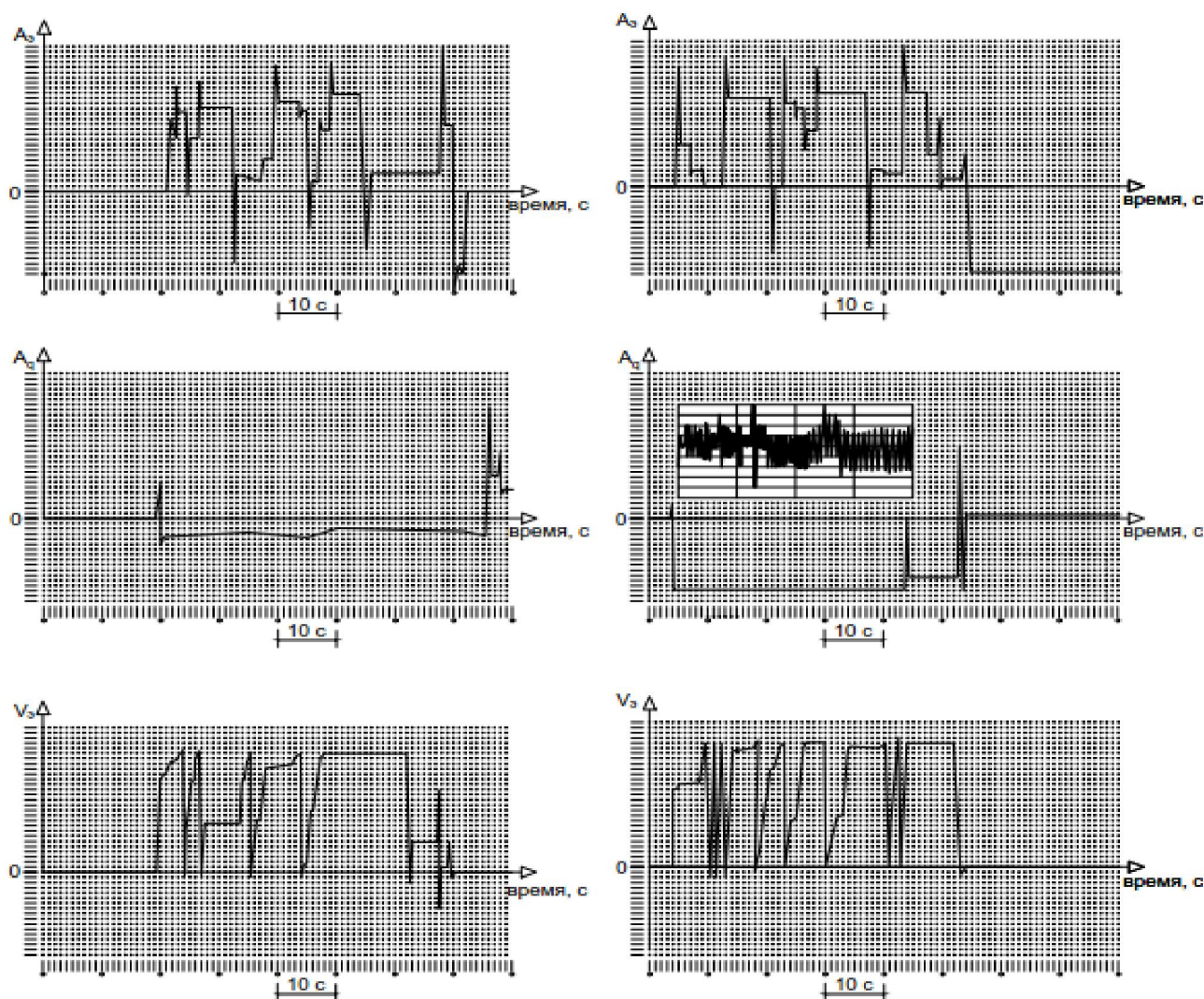


Рисунок 2 – Результаты записи контрольных параметров активности АЭ-сигналов по амплитуде эмиссии в единицу времени A_3 , амплитуды деформации металла A_q , число импульсов АЭ, характеризующее скорость накопления заданного числа эмиссии в единицу времени V_3 при изгибе образца без наложения и с наложением высокочастотной составляющей

Запись контрольных параметров в процессе изгиба образца с ослабленным сечением сделана на ленте самописца НЗ88.

Далее был проведен анализ результатов измерений, оценка степени влияния одночастотного и двухчастотного нагружений на ресурс до разрушения образцов.

Результаты обработки экспериментальных данных влияния нагружения на ресурс приведены в Таблице 1.

Таблица 1 - Результаты экспериментов

N_2 / N_1	297,5/420	342,5/450	342,5/390	277,5/450	277,5/390
$(1 - N_2 / N_1) * 100\%$	29%	24%	12%	38%	29%

N_1, N_2 - циклическая долговечность при низкочастотном и двухчастотном нагружении соответственно, циклов.

Таким образом, из Рисунка 2 и Таблицы 1 видно, что при наложении высокочастотной составляющей на экстремумы низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения с кратностью частоты более 10 создаются условия ускоренного процесса накопления усталостных напряжений в металле, что приводит к сжатию плотности числа импульсов АЭ в единицу времени. Это характерно как для периода накопления повреждений, так и для периода зарождения микротрещин до разрушения образцов. Двухчастотное нагружение в таких условиях приводит к сокращению в среднем на 26 % ресурса относительно низкочастотного нагружения участков газонефтепроводов.

При постановке и проведении экспериментов для повышения степени достоверности результатов экспериментов проведена процедура косвенной верификации, заключающаяся в сравнении полученных результатов оценки ресурса с заимствованными результатами для идентичных металлов, проведенные в работах профессоров В. И. Труфякова и В. В. Харионовского.

После обработки экспериментальных данных установлено, что для описания зависимости снижения циклической долговечности образцов для принятой модели двухчастотного нагружения рекомендуется использовать формулу В.И. Труфякова.

Конкретно для оценки ресурса элементов газонефтепроводов при двухчастотном нагружении необходимо учитывать степень снижения циклической долговечности введением в расчетные модели коэффициента:

$$\theta = \frac{N_1}{N_2} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

где P_1, P_2 - поврежденность металла при низкочастотном и двухчастотном нагружениях (относительный показатель).

Как следует из экспериментов, отношение расчетных к экспериментальным значениям θ имеет разброс, где максимальное отклонение находится в доверительном интервале $1,00 \pm 1,26$.

Для оценки показателя безотказной работы при двухчастотном нагружении газонефтепровода и, в конечном итоге, безопасной эксплуатации газонефтепровода используется, введенная А.Р. Ржаницыным характеристика безопасности γ :

$$\gamma = \frac{1 - \frac{1}{K_3}}{\alpha_n}, \text{ при } \alpha_n \gg \alpha_n, \quad (2)$$

где K_3 – коэффициент запаса работоспособности (отношение математических ожиданий показателей прочности и нагрузки участка газонефтепровода); α_n – коэффициент изменчивости (вариации) прочности металла трубопровода (отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию показателя прочности); α_n – коэффициент изменчивости (вариации) нагрузки (отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию показателя нагрузки).

Характеристика безопасности γ является квантилем нормального распределения показателей прочности и нагрузки. Она непосредственно характеризует вероятность безотказной работы элемента газонефтепровода.

Путем сравнительного анализа коэффициентов запаса работоспособности при низкочастотном и двухчастотном нагружениях газонефтепровода получена формула расчета характеристики безопасности γ_2 при двухчастотном нагружении, которая имеет следующий вид:

$$\gamma_2 = \alpha_n^{-1} \left[1 - (1 - \gamma_1 \cdot \alpha_n) \cdot \left(\frac{P_1^{-1} - 1}{P_1^{-1} - \theta} \right)^{0,32} \right], \quad (3)$$

где γ_1 – характеристика безопасности при низкочастотном нагружении газонефтепровода.

На Рисунке 4 отражена зависимость характеристики безопасности γ_2 от θ при $\gamma_1 = 3,062$ и $4,2739$, что соответствует II и III категорированным участкам магистральных трубопроводов.

Таким образом, исследования долговечности при двухчастотном нагружении газонефтепроводов позволили экспериментально, по диагностическим признакам акустической эмиссии, магнитной анизотропии и коэрцитивной силы, доказать влияние двухчастотного нагружения на циклическую усталость, где установлена закономерность интенсификации накопления усталостных повреждений в металле газонефтепровода вплоть до разрушения. Получена формула расчета характеристики безопасности газонефтепровода при двухчастотном нагружении.

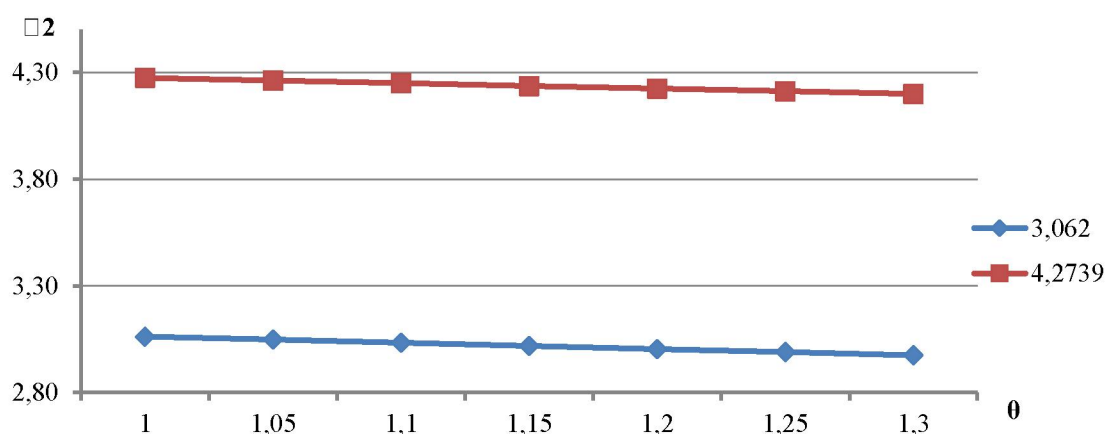


Рисунок 4 – Зависимость характеристики безопасности от величины коэффициента снижения циклической долговечности при двухчастотном нагружении газонефтепровода

Третья глава посвящена разработке расчетных методов оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы.

За основу принята следующая модель накопления поврежденности металла в процессе эксплуатации элемента газонефтепровода при двухчастотном нагружении

$$\Pi = \frac{N_p \cdot \theta}{N_0}, \quad (4)$$

где N_p – расчетное число циклов нагружения элемента газонефтепровода внутренним давлением за установленное время эксплуатации T_3 ; N_0 – число

циклов нагружения элемента газонефтепровода внутренним давлением до предельного состояния, т. е. до зарождения трещины в металле трубопровода.

Дано теоретическое обоснование методов оценки ресурса по заданной вероятности безотказной работы (характеристике безопасности) на основе данных измерительного и допускового контроля газонефтепроводов.

Измерительный контроль газонефтепроводов осуществляется с целью выявления дефектов, установления качественных и количественных характеристик дефектов для оценки степени опасности, а в последующем, определении ресурса дефектного участка. Понятно, что ресурс участка неразрывно связан с вероятностью безотказной работы. Обычно, по результатам контроля выполняется классификация дефектов на опасные и неопасные. Опасные дефекты в текущий момент времени ликвидируются, а неопасные дефекты продолжают функционировать на время назначенного ресурса. При этом предполагается, что неопасные дефекты до исчерпания назначенного ресурса соответствуют приемлемому риску, т.е. соответствуют заданной вероятности безотказной работы. На самом деле это предположение. Такое утверждение вытекает из того, что отсутствуют методы количественной оценки ресурса безопасной эксплуатации по заданной вероятности безотказной работы по результатам измерительного контроля.

Для решения этой задачи получена формула расчета относительного показателя поврежденности металла Π трубопровода по результатам измерительного контроля, которая имеет следующий вид

$$\Pi = 1 - 2,4 \cdot \alpha_{\sigma}^{-1,2}, \quad (5)$$

с ограничениями $2,1 \leq \alpha_{\sigma} \leq 8,0$; $0 < \Pi \leq 0,8$,

где α_{σ} – теоретический коэффициент концентрации напряжений по Нейберу на дефектном участке газонефтепровода.

При этом по заданной характеристике безопасности γ выполняется оценка α_{σ} по следующей формуле

$$\alpha_{\sigma} = \left[\frac{m \left(1 + \frac{1}{n}\right)}{(1 - \gamma \cdot \alpha_{en}) \cdot K_H} - 1 \right]^{2,56}, \quad (6)$$

где m – коэффициент условий работы трубопровода; n – коэффициент надежности по нагрузке трубопровода; K_H – коэффициент надежности по ответственности трубопровода.

В последующем выполняются расчеты по формулам (5) и (4) показателя Π и ресурса N_0 соответственно.

Таким образом, разработан расчетный метод оценки ресурса по результатам измерительного контроля газонефтепроводов.

Допусковый контроль осуществляется с целью подтверждения работоспособного состояния участков газонефтепроводов путем испытаний повышенным внутренним давлением, например гидравлическим давлением. Некоторые авторы утверждают, что испытания осуществляются с целью «выжигания» дефектных участков. Да, это возможно, но при условии установления такого значения повышенного внутреннего давления, при котором не произойдет страгивания и «выжигания» допустимых по нормативам дефектов. Допусковый контроль участков газонефтепроводов выполняется при сдаче нового объекта в эксплуатацию и после реконструкции, а также после капитального ремонта. Важно при этом оценить ресурс объекта. В настоящее время отсутствуют методы количественной оценки ресурса участков газонефтепроводов по результатам допускового контроля. Нами разработан расчетный метод оценки ресурса по результатам допускового контроля участков газонефтепроводов.

Получена формула расчета относительного показателя поврежденности металла по результатам допускового контроля, которая имеет следующий вид:

$$\Pi = 1 - 1,17 \cdot B_{\phi}^{3,1}, \quad (7)$$

со следующими ограничениями $0,56 \leq B_{\phi} \leq 0,95$; $0 < \Pi \leq 0,8$,

где $B_{\phi} = \frac{\sigma_{исп.ф}}{R_2^H}$ – коэффициент перегрузки; $\sigma_{исп.ф}$ – окружное напряжение от фактического испытательного внутреннего давления, МПа; R_2^H – нормативное значение предела текучести металла, МПа.

Одновременно установлена взаимосвязь B_{ϕ} и α_{σ} в следующем виде

$$B_{\phi} = (2,05 \cdot \alpha_{\sigma}^{-1,2})^{0,32}. \quad (8)$$

По разработанному алгоритму задается γ , рассчитываются α_{σ} и B_{ϕ} , а затем по эти результатам и оценивается ресурс по формуле (4), соответствующий заданной вероятности безотказной работы.

Таким образом, разработан расчетный метод оценки ресурса по результатам допускового контроля участков газонефтепроводов. Разработанные расчетные методы оценки ресурса базируются на характеристиках безопасности.

Установлены ограничения по дефектности элементов газонефтепроводов при двухчастотном нагружении. Показано, что при двухчастотном нагружении дефектность основного металла и сварных соединений труб по показателю α_{σ} должна производиться в $\theta^{1,2}$ раза жестче, если основной металл и сварные соединения газонефтепровода находятся в состоянии двухчастотной нагрузки, а не одночастотной нагрузки. Зависимость α_{σ} от θ показана на Рисунке 5.

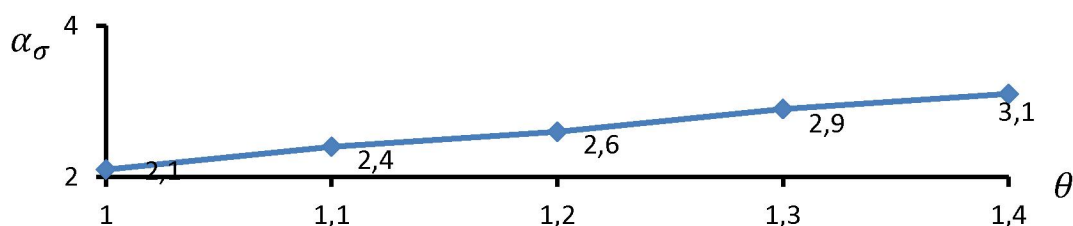


Рисунок 5 – Зависимость α_{σ} от θ

При переходе от нормативного подхода к нормативно-вероятностному подходу появляется возможность количественной оценки характеристики безопасности (вероятности безотказной работы, ожидаемой частоты отказов) по разработанным нами аналитическим зависимостям. Проведена классификация категорированных участков магистральных газонефтепроводов по характеристике безопасности, необходимая для оценки ресурса элементов газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы. При этом установлено, что численные значения характеристик безопасности находятся в пределах 1,9-3,1; 2,9-4,3; 3,8-5,6 для категорий III-IV, I-II, В соответственно. Обоснованы приемлемые значения ожидаемой частоты отказов категорированных участков магистральных трубопроводов III-IV, I-II, В – отказов в год 1×10^{-3} ; 1×10^{-5} ; 1×10^{-8} соответственно.

Четвертая глава посвящена разработке методики оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы.

Методика формируется из четырех этапов.

На первом этапе выполняется расчет на прочность участка газонефтепровода на основе нормативного подхода. На втором этапе выполняется расчет коэффициента запаса работоспособности по характеристике безопасности γ участка газонефтепровода.

При этом расчетное сопротивление R_1 определяется по формуле

$$R_1 = \frac{1 + \frac{1}{K_1}}{K_3 \cdot K_n \left(1 + \frac{1}{n}\right)} \cdot R_1^H, \quad (9)$$

где K_1 – коэффициент надежности по материалу трубопровода; n – коэффициент надежности по нагрузке; R_1^H – нормативное значение временного сопротивления разрыву металла трубопровода, МПа.

На третьем этапе осуществляется расчет ресурса по заданной вероятности безотказной работы участка газонефтепровода, базируясь на формуле Коффина-Мэнсона для оценки долговечности в условиях малоциклового нагружения. Расчет ресурса выполняется по следующей формуле

$$N_1 = \left[\frac{x \cdot E \cdot (R_2^H)^{\frac{1-c}{1+c}}}{n_\varepsilon \cdot (R_1 \cdot K_1^{2,564})^{\frac{2}{1+c}}} \right]^{\frac{1}{m_c}}, \quad (10)$$

где x – коэффициент, характеризующий пластические свойства стали; E – модуль упругости материала труб (для углеродистой и низколегированной стали, допущенной для применения газонефтепроводов стали $E=2,1 \cdot 10^5$, МПа); R_2^H – нормативное значение предела текучести металла трубопровода, МПа; n_ε – коэффициент запаса по деформации металла; m_c – показатель циклического нагружения трубопровода внутренним давлением с учетом коррозионной активности среды; c – показатель деформационного упрочнения стали.

Ресурс при двухчастотном нагружении участка газонефтепровода оценивается по формуле (10) с учетом коэффициента θ , т.е. $N_2 = \frac{N_1}{\theta}$.

На четвертом этапе осуществляется анализ и оценка результатов расчетов по заданным исходным данным и сравнение численных значений ресурса. Обязательным условием оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепровода является определение K_3 и R_1 по заданной (приемлемой) характеристике безопасности γ . При этом допустимой величиной характеристики безопасности является $\gamma = 3,062; 4,2739; 5,6598$ для III-IV; I-II; В категорированных участках магистральных трубопроводов соответственно.

Таким образом, на основе новых аналитических зависимостей разработана методика оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов, где наработка объекта до предельного состояния обосновывается исходя из приемлемого риска.

Оценка результатов расчетов ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов осуществляется в синтезе с уровнем их технического состояния, технико-экономическим обоснованием и информационным обеспечением расчета ресурса.

Уровень технического состояния участков газонефтепроводов определяется по характеристике безопасности и позволяет обосновать ресурс по заданной вероятности безотказной работы.

Сравнение значения характеристики безопасности на стадии проектирования и значения характеристики безопасности за время эксплуатации t_i позволяет проводить анализ технического состояния газонефтепровода по критерию безопасности

Раскрыто содержание системы информационного обеспечения оценки ресурса по заданной вероятности безотказной работы (характеристике безопасности) участков газонефтепроводов. Разработана блок-схема системы, которая содержит режим технического диагностирования, контроль технического состояния, поиск дефектов и прогнозирование технического состояния газонефтепроводов.

Приведены структура и схема формирования системы информационного обеспечения оценки ресурса участков газонефтепроводов.

Технико-экономическое обоснование ресурса участков газонефтепроводов выполняется расчетным методом определения

целесообразных затрат на контроль технического состояния и обеспечения ресурса газонефтепроводов.

Таким образом, на основе установленных закономерностей и аналитических зависимостей разработана методика оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов, где наработка объекта до предельного состояния обосновывается исходя из характеристики безопасности, связанной с вероятностью безотказной работы.

Основные выводы и рекомендации

1 На основании анализа методов оценки ресурса безопасной эксплуатации криволинейных участков с элементами поворота газонефтепроводов обоснована необходимость их совершенствования. Выявлены основные направления разработки расчетных методов, которые включают: установленные закономерности снижения ресурса при двухчастотном нагружении криволинейных участков газонефтепроводов; методы оценки ресурса участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы на базе данных измерительного и допускового контроля. В связи с этим показана необходимость выполнения исследований указанных направлений и разработки методики оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы.

2 Экспериментально доказано, что при наложении высокочастотной составляющей на экстремумы низкочастотной составляющей двухчастотного нагружения кратно по частоте нагружения более 10 создаются условия ускоренного накопления поврежденности и роста дефектов металла, приводящие к снижению несущей способности участков газонефтепроводов. Двухчастотное нагружение приводит к сокращению ресурса в среднем на 26% относительно низкочастотного нагружения участков газонефтепроводов. Получена формула расчета характеристики безопасности при двухчастотном нагружении участка газонефтепровода.

3 Разработаны расчетные методы количественной оценки ресурса по заданной вероятности безотказной работы категорированных участков газонефтепроводов по результатам измерительного и допускового контроля. Проведена классификация категорированных участков газонефтепроводов по характеристике безопасности. При этом для участков категорий III-IV, I-II, В численные значения проектных характеристик безопасности находятся в пределах 1,9-3,1; 2,9-4,3; 3,8-5,6 соответственно.

4 Разработана методика оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов, позволяющая установить ресурс по заданной вероятности безотказной работы, необходимая для обеспечения промышленной безопасности.

Методы и методика оценки ресурса безопасной эксплуатации участков газонефтепроводов по заданной вероятности безотказной работы, разработанные на основе экспериментальных исследований и теоретического обоснования, нормативно-вероятностного подхода, рекомендуются использовать при проектировании и эксплуатации магистральных и промысловых газонефтепроводов для продления сроков службы и обеспечения промышленной безопасности.

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

Ведущие рецензируемые научные журналы

1 Султанов М.Х., Егоров Д.И. Оценка безотказности при двухчастотном нагружении трубопровода //НТЖ «Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов»/ ИПТЭР. – Уфа, 2015 – Вып. 4(102). – С. 194-198.

2 Султанов М.Х., Шурайц А.Л., Егоров Д.И. Метод оценки технического состояния трубопровода по характеристике безопасности //Нефтегазовое дело. / УГНТУ. – Уфа, 2016. – т. 14, №3. – с. 112-115.

3 Султанов М.Х., Шурайц А.Л., Егоров Д.И. Методика оценки ресурса безопасной эксплуатации нефтегазопроводов //НТЖ «Безопасность труда в промышленности». – М., 2016. – №6. – с. 68-70.

4 Егоров Д.И. К вопросу оценки ресурса при двухчастотном нагружении //НТЖ «Безопасность труда в промышленности». – М., 2017. – №6. – с. 46-49

5 A. L. Shurayts, D. I. Egorov // Resource evaluation method for safe use of gas, oil pipeline sections under conditions of bifrequency loading / Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. Volume 1111. 012065

Прочие печатные издания:

6 Егоров Д.И., Султанов М.Х. Метод оценки ресурса по результатам допускового контроля трубопровода // Энергоэффективность. Проблемы и решения: матер. XV Междунар. научн.-практ. конф. – Уфа, 2015. – с. 167-168.

7 Егоров Д.И., Султанов М.Х. Метод оценки ресурса по заданной вероятности безотказности трубопровода // Энергоэффективность. Проблемы и решения: матер. XV Междунар. научн.-практ. конф. – Уфа, 2015. – с. 169-170.

8 Егоров Д.И., Султанов М.Х. Метод оценки ресурса по результатам измерительного контроля трубопровода // Энергоэффективность. Проблемы и решения: матер. XV Междунар. научн.-практ. конф. – Уфа, 2015. – с. 171-172.

9 Султанов М.Х., Ишмуратов М.А., Егоров Д.И. Оценка неразрушающим методом прочностной характеристики металла трубопровода // Энергоэффективность. Проблемы и решения: матер. XV Междунар. научн.-практ. конф. – Уфа, 2015. – с. 173-174.

10 Егоров Д.И., Султанов М.Х. Характеристика безопасности при двухчастотном нагружении газонефтепровода // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения.: матер. Междунар. научн.-практ. конф. – Саратов, 2017. – с. 167-169

11 Егоров Д.И. Ограничения по дефектности при двухчастотном нагружении газонефтепровода// Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: матер. Междунар. научн.-практ. конф. – Саратов, 2018. – с. 189-192

12 Шурайц А. Л., Егоров Д.И. Методика оценки ресурса безопасной эксплуатации газонефтепроводов в условиях двухчастотного нагружения// Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения: матер. Междунар. научн.-практ. конф. – Саратов, 2019. – с. 205-211