

На правах рукописи



БУШИНСКАЯ Анна Викторовна

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА ТРУБОПРОВОДНЫХ
СИСТЕМ С ДЕФЕКТАМИ КОРРОЗИОННОГО ТИПА ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ДИАГНОСТИКИ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена в ФГБУН Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН (НИЦ «НиР БСМ» УрО РАН).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Тимашев Святослав Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Москвичев Владимир Викторович
(Институт вычислительного моделирования
Сибирского отделения РАН, г. Красноярск)

доктор технических наук, профессор
Шефер Леопольд Анатольевич
(Южно-Уральский государственный университет,
г. Челябинск)

Ведущая организация: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
РАН, г. Москва

Защита состоится «30» мая 2012 г. в 15.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.298.02 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский
государственный университет» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,
ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ».

Автореферат разослан «20» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Чернявский А.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблемы безопасности и надежности элементов критических инфраструктур выходят в настоящее время на первый план.

Одним из наиболее распространенных элементов критических инфраструктур являются трубопроводные системы (ТС). Обеспечение надежной и безотказной работы ТС, к которым относятся промышленные и магистральные нефте-, продукто- и газопроводы, трубопроводный транспорт CO₂, паропроводы, водоводы и др., представляет задачу государственной важности.

Отличительной особенностью деградации ТС является, как правило, наличие множества растущих дефектов различной природы, каждый из которых является потенциальной угрозой для их целостности.

Обнаружение дефектов стенок труб в основном производится в ходе диагностики, с применением различного рода измерительных инструментов (ИИ). Информация, выдаваемая ИИ, неизбежно содержит погрешности измерений (ПИ), которые могут существенно исказить оценку реального состояния эксплуатируемой системы.

В связи с этим весьма актуальной становится задача оценки ПИ измерительного инструмента (ИИ), применяемого на самом объекте для определения его состояния. Знание ПИ позволяет их учесть и получить лучшие оценки истинных значений параметров дефектов, на основе которых можно выполнить более надежные расчеты остаточной прочности, вероятности отказа и остаточного ресурса ТС, а также назначить для них оптимальные сроки следующего обследования.

Для адекватной оценки безопасности ТС необходимо уметь определять ее вероятность отказа/надежность и остаточный ресурс как функции времени. В настоящее время расчет линейных участков трубопроводов, как правило, проводят на основе детерминированных методов механики тонкостенных цилиндрических оболочек. Детерминированные критерии не в состоянии дать оценку вероятности отказа ТС в полной мере, так как не учитывают случайность параметров геометрии и свойств материала трубы, нагружения и параметров дефектов (неопределенность их размеров из-за присутствия ПИ при диагностике). Для решения данной проблемы необходимо использовать вероятностные модели, позволяющие оценивать вероятность отказа/надежность ТС.

Для систем с множеством дефектов классический подход теории структурной надежности – представление системы в виде последовательно-соединенных элементов – не всегда применим на практике. При расчете по этой схеме вероятность безотказной работы всей системы равна произведению вероятностей безотказной работы всех элементов (дефектов). Из-за этого с увеличением числа дефектов надежность системы резко снижается, так что практически невозможно образовать систему, обладающую требуемой (высокой) безотказностью. Основная причина этого в том, что не все дефекты системы дают вклад в вероятность отказа (ВО).

Главная проблема обеспечения целостности и безопасности эксплуатации

ТС заключается в необходимости адекватного прогнозирования их будущего технического состояния, на основе которого определяется время (остаточный ресурс) до наступления предупреждающего, критического или предельного состояния.

Так называемые «предупреждающие» и «критические» отказы не приводят к авариям, поскольку являются условными отказами и вводятся из различных инженерных соображений, которые «запускают» определенные действия по поддержанию системы в работоспособном состоянии (диагностика, ремонт, снижение давления перекачки и т.д.). Эти состояния служат «уровнями», которые потом можно оптимизировать в задаче многоуровневой политики управления ВО сложных объектов. В качестве предупреждающего и критического отказа должны выбираться различные вероятностные показатели и/или физические (геометрические) характеристики системы. Реализация данного подхода требует умения вычислять время наступления этих видов условных отказов.

Из сказанного ясно, что разработка методики предсказательного технического обслуживания является весьма актуальной задачей.

В связи с перечисленным выше возникла необходимость в разработке новых подходов к оценке вероятности отказа/надежности и остаточного ресурса ТС, более точно отражающих их физическую сущность, и позволяющих определять оптимальное время для проведения следующей диагностики. Это и стало целью настоящей работы.

Целью диссертационной работы является разработка методики предсказательного технического обслуживания ТС с дефектами коррозионного типа.

Исходя из цели работы, **были поставлены и решены следующие задачи:**

- построена модель деградации несущей способности как единичного дефектного участка трубы, так и распределенной ТС, обладающей множеством дефектов коррозионного типа, в виде неоднородного Марковского процесса чистой гибели (МПЧГ).

- на основе разработанного МПЧГ предложены:

- подход к прогнозированию гамма-процентного остаточного ресурса ТС и единичного дефектного участка трубы;

- модель оценки оптимального периода выполнения профилактических и ремонтных работ в ТС, минимизирующая средства на ее обслуживание;

- разработана методология оценки энтропии, создаваемой процессом деградации дефектного участка ТС с возможным отказом типа «разрыв», а также всего трубопровода как системы, в целях установления соотношений между различными физическими и вероятностными состояниями ТС и возможностью ранней их диагностики по показателю энтропии;

- разработан метод статистического анализа результатов обследования ТС, обеспечивающий калибровку и повышение точности всех измерений параметров дефектов, на основе совместного рассмотрения результатов диагностики и ограниченного по объему дополнительного диагностического

контроля (верификации);

- проведено исследование влияния на вероятность отказа/надежность дефектного трубопровода случайности параметров геометрии трубы, свойств материала трубы, нагрузки и параметров геометрии дефекта;

- проведен анализ уровня надежности, фактически заложенного в СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы»;

- выполнена программная реализация разработанной методики и входящих в нее подзадач.

Объект исследования: процесс деградации ТС с дефектами коррозионного типа.

Предмет исследования: методология оценки вероятности отказа/надежности и остаточного ресурса линейных участков ТС.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории тонких оболочек, механики ТС, теории надежности, теории вероятности и математической статистики, Марковских процессов, теории информационной энтропии, статистического моделирования (Монте-Карло), системного анализа.

Личный вклад автора заключается в разработке нового (МПЧГ) и усовершенствовании существующего методов оценки вероятности отказа/надежности, остаточного ресурса и энтропии линейных участков ТС с дефектами коррозионного типа, а также в разработке методологии, позволяющей получать более точные оценки надежности, остаточной прочности и остаточного ресурса за счет повышения точности измерений параметров дефектов, обнаруженных в ходе диагностики ТС.

Достоверность и обоснованность защищаемых научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается полнотой и корректностью исходных посылок, теоретическим обоснованием, базирующимся на использовании строгого математического аппарата, инженерных методов анализа надежности и безопасности ТС, современных достижений вычислительной техники, сопоставлением полученных результатов с результатами метода статистических испытаний (Монте-Карло), обсуждением результатов на Всероссийских и международных конференциях и многочисленными положительными отзывами рецензентов на опубликованные работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Построена оригинальная модель в виде неоднородного МПЧГ, описывающая как стохастическую деградацию несущей способности единичного дефектного участка трубы, так и распределенной ТС, обладающей множеством дефектов коррозионного типа;

- На основе разработанного МПЧГ предложены:

- метод оценки гамма-процентного остаточного ресурса ТС с дефектами и единичного дефектного участка трубы по критерию возможного отказа типа «разрыв»;

- модель оценки оптимального периода выполнения профилактических и ремонтных работ на ТС;

- Предложена методология оценки энтропии, производимой процессом деградации дефектных участков ТС;

— В известный метод Грама-Шарлье-Эджворта (ГШЭ), внесены поправки на нелинейность функции предельного состояния;

— Предложена методика статистического анализа результатов обследования ТС на основе модели измерений, учитывающей не только случайные ошибки используемых инструментов (основного и верификационного), но также постоянное и мультипликативное смещение внутритрубного инструмента.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

Разработана методология предсказательного технического обслуживания и ремонта ТС с дефектами коррозионного типа, к которым относятся дефекты типа «потеря металла» и «несплошность металла стенки трубы». Дефекты несплошности приводятся к поверхностным дефектам типа «утонение стенки трубы – потеря металла» по методике Газпрома СТО 0-03-22-2008. В отличие от существующих методик, предложенная методология построена на полном наборе последовательно наступающих вероятностных и детерминированных критериев предупреждающего, критического и предельного состояния (отказа).

Знание остаточного времени до наступления того или иного вида состояния (отказа) позволяет оператору трубопровода минимизировать расходы на техническое обслуживание и ремонт ТС без создания угроз ее целостности, и принять обоснованное решение, какой из критериев наступления отказа ему следует использовать в данной конкретной ситуации, а также, когда провести необходимые диагностику, техническое обслуживание и ремонт участков ТС.

Разработанные методы были использованы на практике при расчете вероятности отказа/надежности и остаточного ресурса ряда действующих трубопроводов с дефектами, а также для разработки методологии предсказательного технического обслуживания и ремонта ТС. В частности, предложенная методология использовалась: ЗАО НПО «СПЕЦНЕФТЕГАЗ» для сравнительного анализа результатов диагностики, что подтверждено актом внедрения; ООО «Газпром добыча Оренбург» при проведении комплексной оценки остаточного ресурса участка конденсатопровода, что подтверждено отзывом на научную работу, согласно которому предложенная методика позволила выявить дополнительные пути увеличения остаточного ресурса и оптимизации сроков между очередными диагностическими обследованиями и ремонтами; Для оценки точности измерений всех параметров (глубины, длины, ширины) дефектов, полученных ОАО «Диаскан» в результате обследования участка нефтепровода; ЗАО «ВЕКТ» при оценке технического состояния и времени проведения очередной диагностики промыслового подводного трубопровода, находящегося на Тихоокеанском шельфе.

На примере конкретной ТС показана методология оценки влияния на вероятность отказа/надежность дефектного участка ТС параметров геометрии трубопровода (диаметр и толщина стенки трубы), свойств материала трубы (предел прочности и предел текучести), нагрузки (рабочее давление) и геометрии дефекта (глубина и длина).

Проведен анализ уровня надежности, фактически заложенного в СНИП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы».

Разработанная Марковская модель позволила впервые описать совместное

поведение множества растущих дефектов в трубопроводе как в распределенной системе. Это устраняет недостаток классического подхода теории структурной надежности – представление системы в виде последовательно-соединенных элементов.

Описание процесса деградации несущей способности единичного дефектного участка и распределенной ТС Марковским процессом чистой гибели разработано по гранту на участие в конкурсе молодежных работ 2010 года УрО РАН.

Все разработанные методы реализованы автором в программном комплексе «PRIMA», предназначенном для управления целостностью и безопасностью магистральных трубопроводов по критерию риска.

Основные результаты, выдвигаемые на защиту:

- модель деградации несущей способности единичного дефектного участка трубопровода и распределенной ТС, обладающей множеством дефектов коррозионного типа, в виде неоднородного Марковского процесса чистой гибели;

- метод оценки надежности дефектного участка трубы и распределенной ТС через условную вероятность их возможного отказа типа «разрыв» на основе МПЧГ;

- метод прогнозирования остаточного ресурса единичного дефектного участка трубопровода и ТС на основе разработанного МПЧГ;

- алгоритм оптимизации времени следующего осмотра/ремонта ТС на основе разработанной Марковской модели деградации остаточной прочности трубопровода;

- методология оценки энтропии, создаваемой процессом деградации сечения трубопровода с дефектом, а также всего трубопровода как системы с использованием вероятностных характеристик МПЧГ;

- метод статистического анализа результатов диагностики ТС, обеспечивающий калибровку и повышение точности всех измерений параметров дефектов, на основе совместного рассмотрения результатов диагностики, и ограниченной по объему верификации;

- методология предсказательного технического обслуживания и ремонта ТС с дефектами коррозионного типа, построенная полным наборе последовательно наступающих вероятностных и детерминированных критериев предупреждающего, критического и предельного состояния (отказа).

Апробация работы. Основные результаты, полученные в диссертации, были представлены на:

- четырех Всероссийских конференциях: II, III и IV Всероссийских научно-технических конференциях «Безопасность критичных инфраструктур и территорий», Екатеринбург; III Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» СО РАН, Красноярск; и

- восьми международных конференциях: International Pipeline Conference (IPC), Canada, 2008 и 2010; International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), Japan, 2009; Pipeline Pigging and Integrity Management

Conference, USA, 2009, 2012; Conference and Exposition Rio Pipeline, Brasil, 2009, 2011; Pipeline Operations & Integrity Management, Bahrain, 2012.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы полностью отражено в 18 научных работах автора, в том числе в двух статьях, опубликованных в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК; в 11 статьях, опубликованных в трудах дважды рецензируемых международных конференций¹; в пяти тезисах на Всероссийских конференциях, а также в четырех научно-технических отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем диссертации 214 страниц, включая 56 рисунков, 52 таблицы, 175 литературных источников (из них 70 иностранных).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта общая характеристика диссертационного исследования: обоснована актуальность темы; сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы; охарактеризованы объект и предмет исследования.

В первой главе рассмотрено общее состояние вопроса и представлен аналитический обзор работ, освещающих проблемы оценки целостности и надежности ТС с дефектами, существующие методы расчетов ТС на прочность, надежность и их недостатки. Сформулирована постановка задач исследований.

Во второй главе представлен метод статистического анализа результатов диагностики ТС. Суть метода заключается в сравнении показаний менее точного инструмента с ограниченным множеством измерений более точного (верификационного). Конечная цель метода – калибровка результатов диагностики, позволяющая более точно оценивать истинные значения параметров всех обнаруженных дефектов.

Метод построен на математической модели измерений:

$$p_I = \alpha + \beta p_{tr} + \varepsilon_I, \quad p_V = p_{tr} + \varepsilon_V, \quad (1)$$

где p_{tr} - истинное (неизмеримое) значение измеряемого параметра дефекта, p_I - показание внутритрубного инструмента (ВТИ); p_V - показание верификационного инструмента (ВИ); α, β - постоянные погрешности измерений ВТИ: α - среднее смещение, β - мультипликативное смещение; ε_I - случайная погрешность измерения ВТИ; ε_V - случайная погрешность измерения ВИ.

При известном значении дисперсии ПИ ВИ $\sigma_{\varepsilon V}^2$, которую можно определить по паспорту инструмента, оценки параметров модели измерений (1) α, β вычисляются по формулам:

$$\hat{\beta} = \frac{s_{IV}}{s_V^2 - \sigma_{\varepsilon V}^2}, \quad \hat{\alpha} = \bar{p}_I - \hat{\beta} \bar{p}_V, \quad (2)$$

где \bar{p}_I, \bar{p}_V - выборочные средние измерений ВТИ и ВИ соответственно; s_I^2, s_V^2 -

¹ Общий объем публикаций в трудах международных конференций составляет 8.7 а.п.л.

несмещенные выборочные дисперсии измерений ВТИ и ВИ соответственно, s_{IV} - ковариация измерений ВТИ и ВИ.

Точность ВТИ определяется дисперсией его ПИ:

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon I}^2 = s_I^2 - \hat{\beta}^2 \hat{\sigma}_{tr}^2, \quad (3)$$

где $\hat{\sigma}_{tr}^2 = s_V^2 - \sigma_{\varepsilon V}^2$ - дисперсия истинного значения параметра дефекта p_{tr} .

Оценка истинного размера параметра верифицированного дефекта рассчитывается по формуле:

$$\hat{p}_{tr} = p_V + c_2 r, \quad (4)$$

где $c_2 = f(\hat{\beta}, \hat{\sigma}_{\varepsilon I}^2, \sigma_{\varepsilon V}^2)$ вычисляется на основе *обобщенного* метода наименьших квадратов; $\hat{r} = p_I - \hat{\alpha} - \hat{\beta} p_V$ остатки (разности) между измерениями ВТИ и соответствующими значениями, полученными из регрессионной модели.

Вариация оценки истинного значения параметра *верифицированного* дефекта определяется по формуле:

$$V(\hat{p}_{tr}) = [X C_{\varepsilon\varepsilon}^{-1} X^T]^{-1}, \quad (5)$$

где $C_{\varepsilon\varepsilon}$ - ковариационная матрица ПИ $(\varepsilon_I, \varepsilon_V)$, $X = (\hat{\beta} \ 1)$ - вектор-строка.

Если верифицировано n дефектов, то уточненное значение параметра дефекта для $(n + i)$ -го неверифицированного измерения ВТИ p_I^{n+i} определяется из уравнения:

$$\hat{p}_{tr}^{n+i} = \hat{\xi} + \hat{\gamma} p_I^{n+i}, \quad (6)$$

где $\hat{\xi}, \hat{\gamma}$ параметры калибровочной линии.

Вариация оценки истинного значения параметра *неверифицированного* дефекта:

$$V(\hat{p}_{tr}^{n+i}) = (n-1)^{-1} s_{bb} + V(\hat{\gamma}) \left[(p_I^{n+i} - \bar{p}_I)^2 - \hat{\sigma}_{\varepsilon I}^2 \right] + \hat{\gamma}^2 \hat{\sigma}_{\varepsilon I}^2, \quad (7)$$

где вариация оценки параметра $\hat{\gamma}$ равна:

$$V(\hat{\gamma}) = \frac{\left[(m_V + \sigma_{\varepsilon V}^2) s_{bb} + \sigma_{\varepsilon V}^2 \right] \hat{\gamma}^2}{m_V (n-1)}, \quad (8)$$

а параметры, входящие в это выражение, вычисляются по формулам:

$$s_{bb} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(p_{Vi} - \bar{p}_V) - \hat{\gamma} (p_{Ii} - \bar{p}_I) \right]^2}{(n-2)}, \quad m_V = \begin{cases} s_V^2 - \sigma_{\varepsilon V}^2, & \hat{\lambda} > 1, \\ s_I^2 / s_{IV}^2, & \hat{\lambda} \leq 1, \end{cases} \quad (9)$$

где величина $\hat{\lambda}$ является корнем уравнения:

$$\left| C_{IV} - \hat{\lambda} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon V} \end{pmatrix} \right| = 0. \quad (10)$$

В этом выражении C_{IV} - ковариационная матрица измерений (p_I, p_V) .

Методика проверена с помощью метода статистических испытаний, путем моделирования разных видов распределений. Ее применение к тестовому

примеру² представлены на рис 1 и 2. Из них видно, что оценки истинных значений глубин дефектов, полученные по разработанной методике, намного ближе к истинным значениям, чем неоткалиброванные измерения ВТИ.

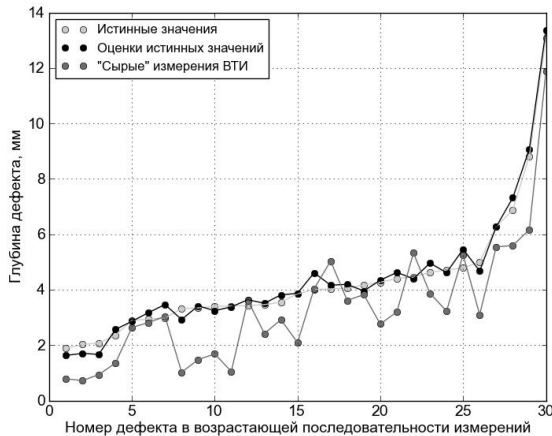


Рисунок 1 – Истинные значения глубин верифицированных дефектов, их оценки и измерения ВТИ

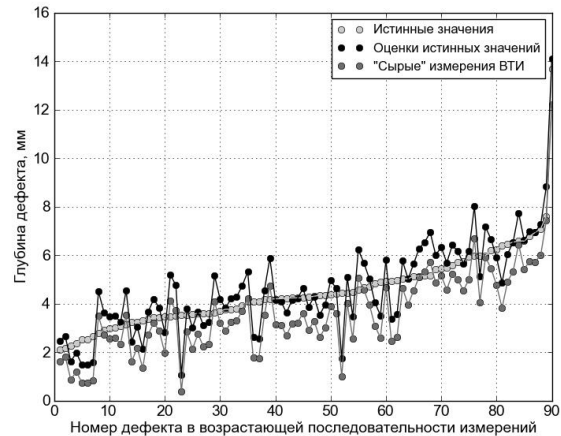


Рисунок 2 – Истинные значения глубин неverified дефектов, их оценки и измерения ВТИ

В третьей главе проведен анализ уровня надежности, фактически заложенного в СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы» и в международные нормы оценки остаточной прочности ТС: B31G, B31Gmod, Battelle, DNV и Shell92.

Согласно проведенному исследованию, СНиП уменьшает за счет сочетания отдельных коэффициентов надежности (зависящих от технологии изготовления трубы, ее диаметра, марки применяемой стали и расчетного давления перекачки) показатели прочности (предел прочности R_1^* и предел текучести R_2^*) материала трубы, на величину, изменяющуюся от 33,7% до 67,2% для R_1^* и от 43,5% до 81,8% для R_2^* . Уменьшенные таким образом R_1^* и R_2^* в статистическом смысле соответствуют квантили бесконечно малого порядка, то есть вероятности того, что реальная прочность материала трубы будет меньше R_1 (R_2).

Учитывая, что нагрузка и прочность материала трубы – независимые случайные величины (СВ), для вероятности события, на которое фактически рассчитывается трубопровод, получим:

$$P = P(R_1) \cdot P(1 - P(nP_{op})), \quad (11)$$

где $P(R_1)$ - вероятность того, что реальная прочность материала трубы будет меньше R_1 ; $P(1 - P(nP_{op}))$ - вероятность того, что нагрузка на трубопровод превысит nP_{op} , где n – коэффициент надежности по нагрузке.

Вышеизложенный анализ применен к реальному наземному нефтепроводу (НП) из трубной стали марки 17ГС и класса прочности K52, с диаметром 720 мм, толщиной стенки трубы 8 мм, III категории по СНиП

² Было смоделировано 120 измерений глубин дефектов (истинные глубины дефектов распределены логнормально), из которых 30 верифицированы.

2.05.06-85*, с проектным давлением 6.2 МПа, допустимым рабочим давлением перекачки $P_{op} = 5,5$ МПа, коэффициентом условий работы $m = 0,9$, коэффициентами надежности по материалу $k_1 = 1,47$ и $k_2 = 1,15$, коэффициентом надежности по назначению трубопровода $k^* = 1$ и коэффициентом надежности по нагрузке $n = 1,1$.

Для данного НП расчетные показатели прочности $R_1 = 312,25$ МПа и $R_2 = 276,26$ МПа.

Согласно рекомендациям лаборатории C-FER³, показатели прочности материала трубы распределены нормально с параметрами:

– предел прочности – матожидание $m = 1,12 \cdot 510,00 = 571,20$ МПа и СКО $\sigma = 0,035 \cdot m = 19,99$ МПа;

– предел текучести – матожидание $m = 1,10 \cdot 353,00 = 388,30$ МПа и СКО $\sigma = 0,035 \cdot m = 13,59$ МПа.

Тогда расчетные показатели прочности R_1 и R_2 будут иметь порядок квантили, равный $5,35 \cdot 10^{-39}$ и $5,55 \cdot 10^{-17}$ соответственно. Следовательно, вероятность того, что реальная прочность материала трубы будет меньше R_1 , практически равна нулю ($5,35 \cdot 10^{-39}$).

Согласно рекомендациям C-FER, отношение между рабочим давлением перекачки $P_{op} = 5,5$ МПа и проектным давлением $P_d = 6,2$ МПа описывается *Бета-распределением* со средним значением $m = 0,865 \cdot 5,500 / 6.200 = 0,767$ и СКО $\sigma = 0,084 \cdot m = 0,064$. Тогда величина $nP_{op} / P_d = 1,100 \cdot 0,887 = 0,975$ будет иметь порядок квантили, равный 0,999999929274. Следовательно, вероятность $P(1 - P(nP_{op})) = 7,07 \cdot 10^{-8}$. Таким образом, расчетная вероятность P из (11) является бесконечно малой ($P = 5,35 \cdot 10^{-39} \cdot 7,07 \cdot 10^{-8}$).

Далее на примере реального ТП с толщиной стенки трубы 9 мм, диаметром 325 мм, пределом текучести 245 МПа, пределом прочности 410 МПа и проектным рабочим давлением 6,4 МПа, показана методология оценки фактического уровня надежности, заложенного в международные нормы расчета ТС с поверхностными коррозионными дефектами - B31G, B31Gmod, Shell92, DNV, PCORRC (Battelle) (основанные на едином коэффициенте запасе прочности) и методология исследования чувствительности вероятности отказа (ВО), то есть оценки влияния на вероятность отказа/надежность дефектного участка ТС случайности параметров геометрии трубопровода (диаметр и толщина стенки трубы), свойств материала трубы (предел прочности и предел текучести), нагрузки (рабочее давление) и геометрии дефекта (глубина и длина).

Для оценки ВО используется вероятностный метод на основе ряда Грама-Шарлье-Эджворта, который позволяет учитывать вероятностный характер параметров геометрии и свойств материала трубы, параметров дефекта и давления перекачки, и оценивать вероятность отказа/надежность единичного дефектного участка ТС. Метод представляет собой оценку вероятности того, что функция предельного состояния (ФПС) единичного дефектного участка ТС в рассматриваемый момент времени t положительна. ФПС $Y(t)$ – это разность

³ Reliability-based Design and Assessment of Onshore Natural Gas Transmission Pipelines - A Proposed Standard. C-FER Project No. L128. – 2005

между оценкой давления разрыва (разрушения) в момент времени t , определяемой по какой-либо обозначенной выше международной норме, и значением рабочего давления перекачки. Неизвестная плотность вероятности ФПС аппроксимируется ортогональным полиномом – частичной суммой ряда ГШЭ.

Для получения более точных оценок ВО дефектного участка ТС в данный метод были внесены поправки на нелинейность ФПС путем уточнения выражений для матожидания и дисперсии СВ $Y(t)$.

Давление разрушения (ДР) идеальной трубы (без дефектов) вычисляется по формуле:

$$P_f = \frac{2wt \cdot \sigma_f}{D} \quad (12)$$

где wt – толщина стенки трубы, D – диаметр трубы, σ_f – напряжение текучести.

Все рассматриваемые нормы вместо напряжения текучести используют либо $SMYS$ либо UTS , прибавляя к ним или умножая их на свой коэффициент, где $SMYS$ и UTS – минимальный предел текучести и предел прочности материала трубы, соответственно.

С помощью метода ГШЭ была получена ВО идеального ТП. Результаты расчета, в зависимости от числа параметров ТП, рассматриваемых как СВ, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Вероятность отказа геометрически идеального трубопровода

Использование в (12) вместо σ_f	Все параметры ТП СВ	Все параметры ТП СВ кроме			
		Диаметра	Толщины стенки трубы	SMYS или UTS	Давления
$SMYS$	$7,39 \cdot 10^{-19}$	$7,10 \cdot 10^{-19}$	$4,38 \cdot 10^{-22}$	$6,71 \cdot 10^{-26}$	$8,74 \cdot 10^{-39}$
UTS	$1,55 \cdot 10^{-47}$	$1,31 \cdot 10^{-47}$	$1,44 \cdot 10^{-62}$	$9,28 \cdot 10^{-86}$	$5,63 \cdot 10^{-66}$

Согласно таблице 1 наибольшая вероятность отказа идеального ТП наблюдается для случая, когда все его параметры – случайные величины. Наиболее чувствительной ВО оказалась к случайности рабочего давления при использовании $SMYS$, и к пределу прочности при использовании UTS (ВО в этих случаях минимальна). Далее, в порядке убывания чувствительности ВО, идут: в случае использования $SMYS$ – предел текучести и толщина стенки трубы, в случае использования UTS – давление и толщина стенки трубы. В обоих случаях ВО не чувствительна к диаметру ТП.

На следующем шаге была найдена оценка ВО идеального ТП, в зависимости от используемой нормы расчета ТС на прочность.

По результатам расчета все методики дают наибольшую вероятность отказа, когда все параметры ТП – случайные величины. Наиболее чувствительной ВО оказалась к давлению – для методик B31G, B31Gmod, и к пределу прочности – для методик Battelle, DNV, Shell92. Далее, в порядке убывания чувствительности ВО, идут предел текучести и толщина стенки трубы – для методик B31G, B31Gmod, и давление и толщина стенки трубы – для методик Battelle, DNV и Shell92. Во всех случаях ВО не чувствительна к диаметру ТП.

Для оценки влияния на ВО дефектного участка ТС случайности его

параметров, параметров трубопровода и нагрузки были рассмотрены два характерных дефекта типа «потеря металла»: первый – самый протяженный и неглубокий, второй – самый глубокий, но не протяженный. Параметры дефекта №1 – глубина 2,25 мм и длина 226 мм, у дефекта №2 – глубина 5,62 мм и длина 70 мм.

При оценке ВО этих дефектов рассматривалось шесть случаев: №1 - все параметры СВ, кроме диаметра; №2 - все параметры СВ, кроме толщины стенки трубы; №3 - все параметры СВ, кроме глубины и длины дефектов; №4: все параметры СВ, кроме предела текучести и прочности материала трубы; №5 - все параметры СВ, кроме рабочего давления; №6 - все параметры СВ.

Проведенное исследование позволило сделать следующие общие выводы (см. рисунок 3 и 4):

– ВО для всех методик наиболее чувствительна к случайности глубины и длины дефекта. Разница между оценками ВО в случаях №3 и №6 очень существенна. Когда параметры дефекта – детерминированные величины, *вероятность отказа минимальна (надежность максимальна)* даже при рассмотрении глубоких или протяженных дефектов.

– для методик B31G и B31Gmod вторым параметром по чувствительности ВО является случайность рабочего давления перекачки, а для методик Battelle, DNV и Shell92 – случайность предела прочности материала трубы.

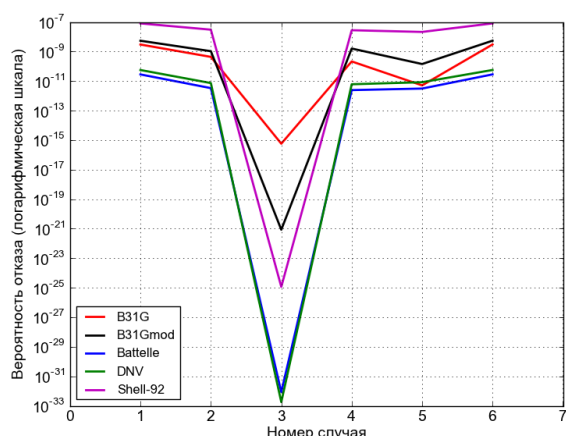


Рисунок 3 – Вероятность отказа самого протяженного дефекта

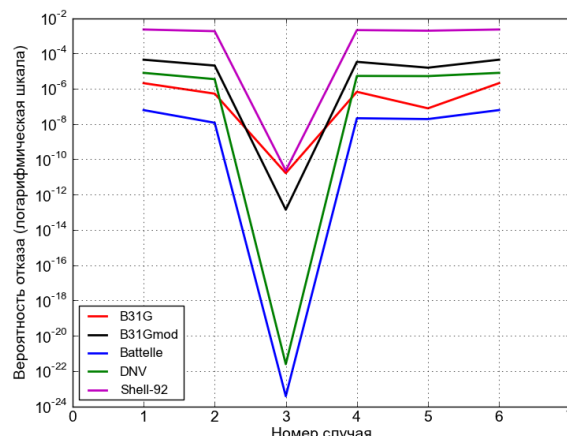


Рисунок 4 – Вероятность отказа самого глубокого дефекта

В четвертой главе деградация остаточной прочности (уменьшение значения давления разрушения) единичного дефектного участка ТП и распределенной ТС с дефектами описана неоднородным Марковским процессом чистой гибели (МПЧГ).

Возможный диапазон $[P_{op}; P_f(0)]$ изменения ДР $P_f(t)$ разбивается на $M-1$ равных непересекающихся интервалов (состояний), где $P_f(0)$ - ДР в начальный момент времени $t = 0$, P_{op} – рабочее давление перекачки. Последнее состояние (состояние отказа) принимается равным $(0; P_{op}]$.

Вероятности нахождения ДР дефектного участка ТП в каждом состоянии в момент времени t , полученные путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс перехода ДР из некоторого (заданного) в другое состояние, вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} P_i(t) = \frac{\rho^{i-1}(t)}{(i-1)!} \cdot \exp\{-\rho(t)\}, i = 1, \dots, M-1, \\ P_M(t) = 1 - \left[\exp\{-\rho(t)\} + \sum_{i=2}^{M-1} \frac{\rho^{i-1}(t)}{(i-1)!} \cdot \exp\{-\rho(t)\} \right], \end{cases} \quad (13)$$

где функция $\rho(t)$:

$$\rho(t) = \int_0^t \mu(\tau) d\tau, \quad (14)$$

В этой формуле $\mu(t)$ - интенсивность перехода из одного состояния в другое, связанная со скоростью изменения СВ $P_f(t)$ следующим образом:

$$\mu(t) = -P'_f(t) / \Delta I, \quad (15)$$

где ΔI - ширина интервалов.

Для распределенной ТС выражения (13) принимают вид:

$$\begin{cases} P_k(t) = \sum_{i=1}^k \left[p_i^* \frac{\rho^{k-i}(t)}{(k-i)!} \right] \cdot \exp\{-\rho(t)\}, k = 1, \dots, M-1, \\ P_M(t) = 1 - \left[p_1^* + \sum_{k=2}^{M-1} \left(\sum_{i=1}^k \left[p_i^* \frac{\rho^{k-i}(t)}{(k-i)!} \right] \right) \right] \exp\{-\rho(t)\}, \end{cases} \quad (16)$$

где $p_1^*, p_2^*, \dots, p_M^*$ - начальное (при $t = 0$) распределение ДР дефектных участков по M состояниям:

$$p_i^* = P_i(0) = n_i(0) / N, \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (17)$$

где $n_i(0)$ - число дефектов, давление разрушения которых в момент времени $t = 0$ попало в i -ый интервал, N - общее число обнаруженных дефектов.

Для ТС с дефектами значение функции $\rho(t)$ в конкретный момент времени t определяется как *выборочная* квантиль порядка α набора значений функций $\rho(t)$ ($i = 1, \dots, N$) всех дефектов, т.е. $\rho(t) = \rho^k(t)$, где $\rho^k(t)$ - k -ая порядковая статистика вариационного ряда $\rho^1(t) \leq \rho^2(t) \leq \dots \leq \rho^N(t)$ выборки значений функций $\rho_1(t), \rho_2(t), \dots, \rho_N(t)$ в рассматриваемый момент времени t . $k = [\alpha N + 1]$, где $[\dots]$ - целая часть. Порядок α выбирается из различных инженерных соображений, или решения соответствующей оптимизационной задачи.

В выражениях (13), (16) вероятность $P_M(t)$ нахождения СВ $P_f(t)$ в последнем интервале (состоянии отказа) является вероятностью отказа дефектного участка (ТС с дефектами) в момент времени t по критерию «разрыв».

На основе построенного МПЧГ определяется *гамма-процентный остаточный ресурс* t_γ единичного дефектного участка (ТС с дефектами), то есть время, в течение которого поперечное сечение ТП с дефектом (ТС с дефектами) *не достигнет* предельного состояния по отказу типа «разрыв» с вероятностью γ , заданной в процентах, путем численного решения относительно времени t_γ следующего уравнения:

$$t_\gamma : F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (18)$$

где $F(t_\gamma) = P_M(t_\gamma)$ функция распределения времени пребывания ДР в первых ($M-1$) состояниях.

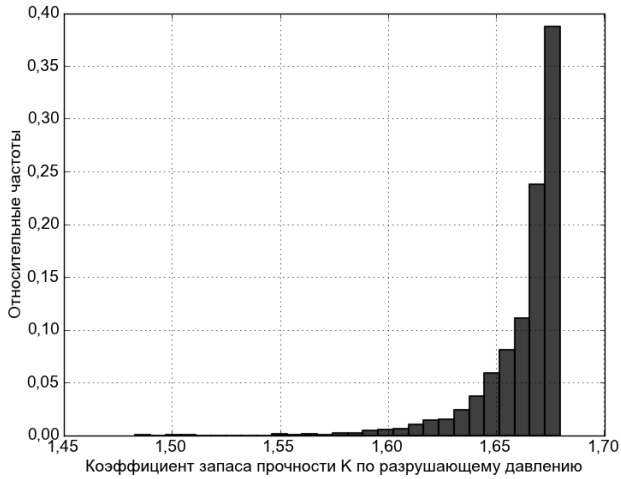


Рисунок 5 – Гистограмма коэффициентов запаса прочности дефектных участков

На рисунке 5 представлена гистограмма коэффициентов запаса (КЗ) прочности дефектных участков ТП по разрушающему давлению, соответствующих гамма-процентному остаточному ресурсу (ГПОР) при $\gamma = 90\%$. При расчетах использовалась норма В31Gmod. В анализе участвовали 3372 дефекта типа «потеря металла» реального ТП, параметры которого определены выше.

Согласно проведенному анализу с использованием всех норм прочности, ГПОР дефектов при $\gamma = 90\%$ в среднем соответствует КЗ прочности K от 1,5 до 2,0, причем СКО этих коэффициентов во всех случаях не превышает 0,03, что соответствует 1,5 - 2,0 % от их матожидания.

Оптимальный период контроля и выполнения профилактических и ремонтных работ на ТС определяется из условия минимума суммарной функции затрат $S(\tau_{or})$ на поддержание трубопровода в исправном состоянии:

$$\tau_{or} : S(\tau_{or}) = C_0 P_M(\tau_{or}) + C_{ILI} \frac{\tau_d}{\tau_{or} + \tau_r} \rightarrow \min, \quad (19)$$

где τ_d – срок эксплуатации трубопровода; τ_r – среднее время проведения профилактических и ремонтных работ; C_{ILI} – стоимость проведения инспекции/диагностики; C_0 – стоимость последствий отказа; $P_M(\tau_{or})$ – вероятность того, что в момент τ_{or} давление разрушения находится в состоянии отказа; $C_0 P_M(\tau_{or})$ – вероятный убыток от аварии, когда ДР находится в последнем состоянии.

Функция $S(\tau_{or})$ непрерывна и дифференцируема при любом τ_{or} : $d(\tau_{or}) < wt$, где $d(\tau_{or})$ – глубина дефекта в момент τ_{or} , поэтому оптимальный период τ_{or} определяется с помощью численного решения уравнения:

$$S'_{\tau_{or}} = -\frac{\tau_d}{(\tau_{or} + \tau_r)^2} C_{ILI} + P'_M(\tau_{or}) C_0 = 0. \quad (20)$$

В пятой главе представлена методология оценки энтропии, производимой процессом деградации дефектных участков ТС. Этот физический показатель является более общим чем вероятность. Энтропия дефектного участка ТС как функция времени, производимая деградацией остаточной прочности, вычисляется по формуле:

$$H_d(t) = -\sum_{j=1}^M P_j(t) \ln[P_j(t)], \quad (21)$$

где $P_j(t)$ – вероятность нахождения ДР дефектного сечения трубы в j -ом состоянии I_j ($j = 1, 2, \dots, M$) в момент времени t , вычисленная по формулам (13).

В предположении, что дефекты независимы между собой, энтропия всего трубопровода как системы дефектов, оценивается по формуле:

$$H_P(t) = \sum_{i=1}^N H_{d_i}(t) = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij}(t) \ln [P_{ij}(t)], \quad (22)$$

где $P_{ij}(t)$ - вероятность нахождения ДР i -го дефектного сечения трубы в j -ом состоянии в момент времени t , вычисленная по формулам (13).

Некоторые результаты проведенного анализа представлены на рисунках 6 и 7.

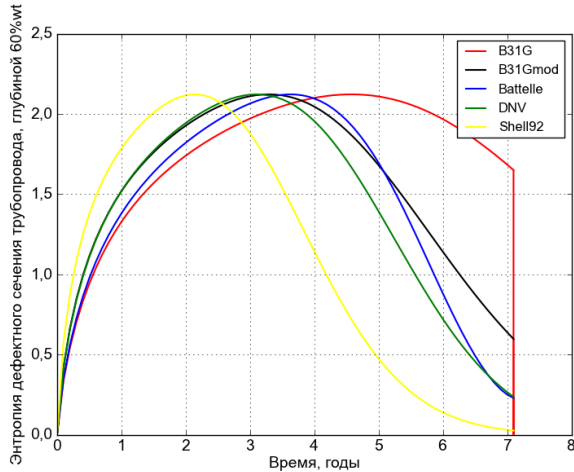


Рисунок 6 – Изменение энтропии дефектного участка, глубиной 60%wt

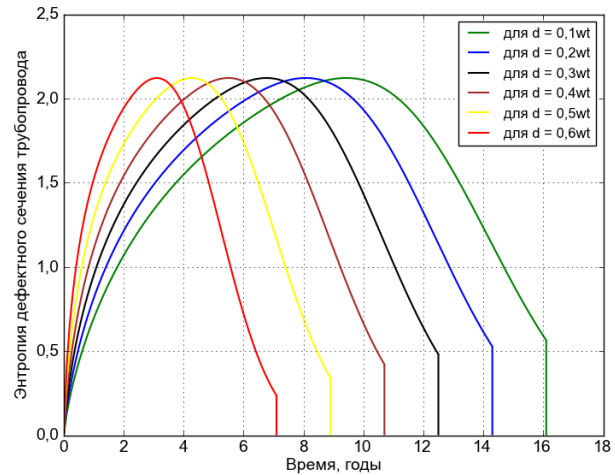


Рисунок 7 – Изменение энтропии шести дефектных участков TC (норма DNV)

Согласно проведенному исследованию, максимум энтропии дефектного сечения имеет одинаковое значение, инвариантное относительно используемой нормы, глубины и скорости роста дефекта, что подтверждает его фундаментальную природу. Энтропийный показатель может быть использован для ранней диагностики состояния ТС и оптимизации планирования его технического обслуживания.

В шестой главе представлена комплексная методология предсказательного технического обслуживания и ремонта ТС. По сути эта методика обобщает все разработанные методы, описанные выше. Методология построена на полном наборе последовательно наступающих вероятностных и детерминированных критериев предупреждающего, критического и предельного состояния (отказа) ТС с дефектами, см. таблицу 2.

Таблица 2 – Используемые критерии

№	Используемый критерий	Описание критерия
		<i>Детерминированные критерии</i>
1	$d(t) = k_d \cdot wt$	Глубина дефекта $d(t)$ равна $k_d \cdot 100\%$ толщины стенки трубы wt . Критерий достижения дефектом критического состояния.
2	$d(t) = wt$	Глубина дефекта $d(t)$ равна $100\% wt$. Критерий достижения дефектом предельного состояния.
3	$P_a(t) = P_{op}$	Максимально допустимое рабочее давление $P_a(t)$ равно рабочему давлению P_{op} . Критерий достижения дефектом критического состояния.
4	$P_f(t) = P_{op}$	Давление разрушения $P_f(t)$ равно P_{op} . Критерий достижения дефектом предельного состояния.

Продолжение таблицы 2

Вероятностные критерии		
5	$BO = Q_l$	ВО дефектного участка ТП равна предельно допустимой ВО Q_l . Критерий достижения дефектом уровней риска, в зависимости от нормативных значений Q_l .
6	t_γ	Гамма-процентный остаточный ресурс, рассчитанный на основе МПЧГ. Критерий достижения дефектом критического состояния.
7	τ_{or}	Оптимальное время ремонта дефекта, вычисленное на основе МПЧГ.

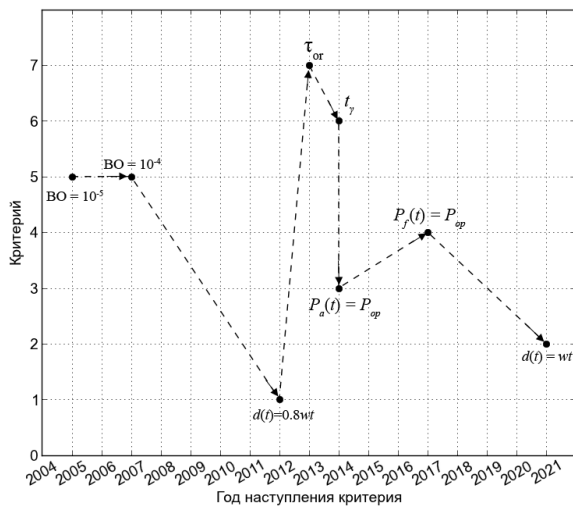


Рисунок 8 – Наступление критериев таблицы 2 в хронологическом порядке

На рисунке 8 представлено время наступления критериев таблицы 2 для самого опасного дефекта ТП. Согласно рисунку 4 критерий 5 достигнут в 2005 году (ВО равна 10^{-5}) и в 2007 году (ВО равна 10^{-4}). Далее идут: критерий №1 ($d(t) = 0,8wt$), критерий №7 (оптимальное время ремонта согласно МПЧГ), критерий №6 (ГПОР согласно МПЧГ), критерий №3 ($P_a(t) = P_{op}$), и критерий №4 ($P_f(t) = P_{op}$) и критерий №2 ($d(t) = wt$). По сути это описание последовательности развития аварийной ситуации на ТП.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертация выполнена как системное исследование. Она представляет собой совокупность связанных между собой задач, когда решение (выход) первой задачи является исходным (вход) для второй и третьей задач, а результаты их решения используются при разработке методики оптимальной эксплуатации ТС.

Разработана методология предсказательного технического обслуживания и ремонта ТС с дефектами коррозионного типа.

Предложенный метод позволяет принимать обоснованные решения, когда проводить диагностику, техническое обслуживание и ремонт трубопровода и минимизировать эксплуатационные расходы, без создания угроз для его целостности.

Полученные результаты, по мнению автора, имеют универсальный и методический характер и могут найти применение при оценке вероятности отказа/надежности и остаточного ресурса ТС различного назначения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Описание процесса деградации тонкостенных трубопроводных систем с дефектами Марковской моделью чистой гибели [Текст] / А.В. Бушинская, С.А. Тимашев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 5. – С. 120-126.

2. Вероятностная методика предсказательного обслуживания трубопроводных систем [Текст] / С.А. Тимашев, А.В. Бушинская // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1(2). – С. 548-556

В трудах рецензируемых международных конференций:

1. Comprehensive methodology of predictive maintenance of pipelines with different types of defects based on ILI data analysis [Текст] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Conference and exposition Rio Pipeline. – Rio de Janeiro, Brasil. – September 2011. – Paper #IBP1599_11 (0,8 а.п.л.)

2. Description of pipeline strength degradation as a pure death Markov process and its implementation in IMP [Text] / A.V. Bushinskaya // Proceedings of IPC Conference. Calgary, Canada. – September 2010. – Paper #IPC2010-31275 (0,7 а.п.л.)

3. Diligent statistical analysis of ILI data: implications, inferences and lessons learned [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Pipeline Pigging and Integrity Management Conference. – Houston. – February 2009. – Paper #19 (1,0 а.п.л.)

4. Holistic statistical analysis of structural defects inspection results [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Proceedings of ICOSSAR Conference. – Japan, Osaka. – September 2009. – Paper #ICOSSAR09-0773 (0,7 а.п.л.)

5. Internet – oriented method of reliability analysis of on-shore pipelines with growing defects [Text] / S.A. Timashev, M.G. Malyukova, L.V. Poluyan, A.V. Bushinskaya // Proceedings of IPC Conference. – 2008. – Paper #IPC2008-64545 (0,9 а.п.л.)

6. On-line method of reliability analysis of pipelines with growing defects [Text] / L.V. Poluyan, A.V. Bushinskaya, M.G. Malyukova, S.A. Timashev // ICOSSAR. – Japan. – 2009. Paper #ICOSSAR09-0155 (0,7 а.п.л.)

7. Practical methodology of predictive maintenance for pipelines [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Proceedings of IPC Conference. – Calgary, Canada. – September 2010. – Paper #IPC2010-31197 (0,9 а.п.л.)

8. Predictive maintenance of pipelines [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Pipeline Operations & Integrity Management. – Bahrain. – March 2012. – Paper #7 (1,0 а.п.л.)

9. Predictive maintenance of pipelines with different types of defects [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Pipeline Pigging and Integrity Management Conference. – Houston. – February 2012. – Paper #17 (0,9 а.п.л.)

10. Statistical analysis of real ILI data: implications, inferences and lessons learned [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Conference and exposition Rio Pipeline. – Rio de Janeiro, Brasil. – 2009. – Paper #IBP1566_09 (0,5 а.п.л.)

11. Statistical implications of adjustments of raw ILI data [Text] / S.A. Timashev, A.V. Bushinskaya // Conference and exposition Rio Pipeline. – Rio de Janeiro, Brasil. – 2009. – Paper #IBP1567_09 (0,6 а.п.л.)