

На правах рукописи

Перов Сергей Николаевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» на кафедре прочности летательных аппаратов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Матвиенко Юрий Григорьевич

доктор технических наук, профессор
Пономарев Юрий Константинович

доктор физико-математических наук, профессор
Радченко Владимир Павлович

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Самарское
конструкторское бюро машиностроения»
(г. Самара)

Защита состоится 19 июня 2009 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.215.02
доктор технических наук, профессор

_____ Д.Л. Скуратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В Российской Федерации протяженность магистральных нефте- и газопроводов составляет около 200 тыс. км, промышленных трубопроводов – 350 тыс. км. Для их функционирования используются около 800 компрессорных и нефтегазоперекачивающих станций. Значительное количество магистральных трубопроводов уже имеет большой срок эксплуатации, зачастую в экстремальных условиях, поскольку они прокладывались в самых разнообразных топографических, геологических, гидрологических и климатических условиях. Причиной повреждения и разрушения трубопроводов часто является ослабление стенки трубы из-за наличия трещиноподобных дефектов. В связи с тем, что период эксплуатации трубопроводов составляет 20...30 лет, происходит процесс деградации трубной стали, изменяется предел текучести и другие механические характеристики материала и сварных соединений. При этом аварии и катастрофы, связанные со сбросом нефти и нефтепродуктов, составляют до 60% техногенных чрезвычайных ситуаций с экологическими последствиями.

В то же время в течение последних десятилетий в России созданы и продолжают интенсивно вводиться в строй уникальные по протяженности новые сложные технические системы трубопроводного транспорта природного газа, нефти и нефтепродуктов. Разработка новых месторождений на Сахалине, Камчатке, Дальнем Востоке вызвала необходимость проектирования и строительства новых путепроводов в условиях вечной мерзлоты, сейсмической активности, заболоченности местности и других экстремальных факторов.

В связи с этим задача количественной оценки работоспособности линейных частей существующих магистральных трубопроводов и обеспечения надежности и безопасности новых трубопроводных систем на стадии их проектирования в последние годы приобрела огромную актуальность. Однако из-за недостаточной информации о действующих нагрузках и весьма приближенного представления о значениях механических характеристик материала конструкции, определяющих его сопротивление действующим нагрузкам, основным методом оценки прочностной надежности остается назначение запасов прочности. Значения этих запасов принимаются в зависимости от стабильности условий нагружения, справочных данных о механических характеристиках, уровня технологии и ряда других факторов, а допустимые значения запасов прочности назначают с учетом инженерного опыта создания подобных конструкций. До настоящего времени отсутствует теоретическое и экспериментальное обоснование составляющих запаса прочности, не учитывается стохастическая природа действующих нагрузок и характеристик используемых конструкционных материалов, что приводит к существенному увеличению металлоемкости трубопроводов и назначению неоправданно высоких значений коэффициентов запаса. Так, например, в соответствии со СНиП 2.05.06-85* суммарный коэффициент запаса из условий работы трубопровода, надежности по материалу, по нагрузке и т.п. составляет около 5,0. Таким образом, существующие в отрасли нормы и правила проектирования, основанные на нормативном методе расчета конст-

рукции по предельным состояниям, не позволяют проводить комплексную оценку надежности в соответствии с современными требованиями, поскольку не учитывают в явном виде не только временные факторы, но и вероятностную природу характеристик несущей способности и нагрузок. При этом разработанные в других отраслях (авиастроении, ракетостроении, строительстве и т.д.) до уровня практических приложений методы количественной оценки надежности, основанные на общей теории надежности В.В. Болотина, используются в научных работах, посвященных конструктивной надежности трубопроводного транспорта, эпизодически и фрагментарно.

Цель работы. Разработка методов комплексной количественной оценки показателей надежности проектируемых и находящихся в эксплуатации трубопроводных сооружений с учетом влияния совокупности конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а также с учетом стохастического характера эксплуатационных нагрузок и рассеивания характеристик трещиностойкости и прочности элементов конструкций.

Задачи исследования.

1. Разработка общей схемы проведения мероприятий по количественной оценке и обеспечению надежности трубопроводных систем при их проектировании и эксплуатации с учетом видов возможного разрушения.

2. Создание методик комплексной количественной оценки показателей надежности бездефектных элементов трубопроводных систем и силовых элементов с трещинами с учетом внезапных и постепенных отказов.

3. Разработка методики конечно-элементного решения трехмерной задачи механики разрушения, моделирования поверхностных трещин в трубах и проведение анализа влияния геометрических параметров на значения коэффициентов интенсивности напряжений для различных типоразмеров труб с несквозными поверхностными трещинами.

4. Разработка методики количественной оценки влияния сложных условий эксплуатации на надежность трубопроводных систем на примере оценки безопасности перехода подземного газопровода через сейсмический разлом.

5. Выполнение комплекса исследований по применимости и использованию для решения задач статистической динамики принципа суперпозиции при моделировании реализаций случайных внешних воздействий сложной структуры с помощью неканонического разложения и метода интерполяционных полиномов.

6. Апробация разработанных методик количественной оценки показателей прочности и надежности на реальных элементах трубопроводных систем.

Объект исследования. Процессы изменения параметров состояния силовых конструкций систем трубопроводного транспорта и их несущих элементов при статических и динамических случайных внешних воздействиях в сложных условиях эксплуатации.

Предмет исследования. Расчетно-экспериментальные методы комплексной количественной оценки показателей конструктивной надежности трубо-

проводов по результатам диагностики их эксплуатационного состояния и на этапе проектирования.

Методы исследований. Работа выполнена на основе классических методов строительной механики, теории упругости, теории пластичности, механики разрушения, теории прочности и надежности сложных технических систем. Использовались методы аналитического и численного решения первой основной задачи статистической динамики с учетом возможной нелинейности исследуемой системы. Для определения вероятности безотказной работы силовых элементов на стадии образования усталостных трещин применялись положения модифицированной теории подобия усталостного разрушения. Решение задач о трещине при квазистатическом или циклическом нагружении проводилось с использованием положений механики разрушения и разработанных макросов для вычислительного пакета ANSYS. Анализ и обработка результатов численных экспериментов по определению вероятностных характеристик свойств исследуемой системы или параметров ее поведения выполнялись классическими статистическими методами с привлечением современной компьютерной техники.

Научная новизна.

1. Создана новая модель комплексной оценки показателей надежности элементов трубопроводных систем с учетом возможности внезапных и постепенных отказов по критериям прочности, усталости, трещиностойкости и живучести, позволяющая проводить сравнение новых проектных решений и определять остаточный ресурс эксплуатирующихся трубопроводов; созданы соответствующие расчетные методики.

2. На базе общей теории надежности разработаны научно-методические основы комплексной оценки вероятности безотказной работы подземных участков трубопроводов в зоне переходов через сейсмические разломы, включающие детерминированный расчет, решение задачи статистической динамики методом интерполяционных полиномов и вычисление функции безопасности.

3. На основе метода интерполяционных полиномов создан эффективный по скорости и точности численный подход к решению задач статистической динамики для трубопроводов, эксплуатирующихся в различных экстремальных условиях.

4. В результате моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) в вершине полуэллиптической поверхностной трещины методом конечных элементов и проведенного численного эксперимента получены простые полуэмпирические соотношения, позволяющие находить значения параметров механики разрушения у фронта трещин различной ориентации.

5. На основе метода интерполяционных полиномов впервые разработан алгоритм и создана эффективная методика моделирования реализаций случайных процессов изменения внешней нагрузки сложной структуры.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач исследования, использованием научно обоснованных

расчетных схем, применением апробированных аналитических и численных методов анализа и расчета, реализацией алгоритмов и процедур расчета на современной вычислительной технике, корректным заданием исходных данных и объективным анализом полученных результатов.

На защиту выносятся:

1. Методы, методики, алгоритмы и вычислительные процедуры комплексной оценки количественных показателей конструктивной надежности трубопроводных систем при их эксплуатации и проектировании с учетом технологических факторов и экстремальных условий внешней среды по критериям прочности, усталости, трещиностойкости и живучести.

2. Методика оценки надежности силовых элементов конструкций сложных технических систем с учетом возможности внезапных и постепенных отказов с различными коэффициентами корреляции между ними.

3. Новые подходы, алгоритмы и процедуры моделирования реализаций случайных процессов со сложным спектром на основе численного метода интерполяционных полиномов, позволяющего существенно повысить точность решения задач статистической динамики и на порядок сократить количество необходимых интегрирований системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение рассматриваемого объекта.

4. Методика и алгоритм количественной оценки параметров механики разрушения вдоль фронта полуэллиптической трещины, основанные на численном эксперименте по моделированию методом конечных элементов НДС в трубах с поверхностными трещинами различной ориентации.

5. Разработанные научно-методические основы анализа функций риска и безопасности подземных трубопроводов в зонах сейсмического разлома, базирующиеся на статистических представлениях о параметрах, характеризующих окружающую среду, свойствах конструкционных материалов, геометрии трубы и ее несущей способности.

6. Результаты апробации предложенных методик, математических моделей, разработанных алгоритмов расчетов, а также результаты решения задач статистической динамики и комплексной оценки показателей надежности реальных трубопроводных систем, работающих в условиях нестационарной нагрузки.

Практическая значимость проведенных в диссертационной работе исследований заключается в следующем:

1. Разработанная методика комплексной оценки показателей конструктивной надежности трубопроводных систем по критериям прочности, долговечности, трещиностойкости и живучести позволяет проводить количественное сравнение проектных решений для новых трубопроводов, предназначенных к эксплуатации, в том числе в сложных условиях. Расчеты на этапе проектирования позволяют эффективно (в том числе экономически) сделать выбор трассы магистрального трубопровода, способа и технологии его прокладки и других факторов.

2. Предложенные методики, алгоритмы и процедуры позволяют определять вероятность безотказной работы, остаточный ресурс, периодичность технических осмотров используемых трубопроводов по результатам диагностики наличия и распределения трещиноподобных поверхностных дефектов в стенках труб.

3. Разработанные и апробированные подходы, алгоритмы и процедуры компьютерного моделирования реализаций случайных процессов со сложным спектром на основе метода интерполяционных полиномов позволяют эффективно решать численными методами широкий класс задач статистической динамики для сложных технических объектов при их моделировании системой линейных и нелинейных дифференциальных уравнений.

4. Создана методика и полуэмпирическая модель вычисления значений параметров механики разрушения вдоль фронта несквозных полуэллиптических трещин различной ориентации, расположенных у поверхности трубы. Методика позволяет, не прибегая к построению сложных аналитических или численных моделей, с высокой точностью определить значения коэффициента интенсивности напряжений и возможное направление развития трещин при квазистатических и циклических нагрузках.

5. Предложенная методика построения семейства кривых усталости по образованию с заданной вероятностью макротрещин в стенках элементов трубопроводных систем дает возможность в несколько раз снизить требуемое количество экспериментальных данных по усталостным свойствам используемых конструкционных материалов, что существенно снижает трудоемкость и стоимость расчетов при проектировании новых продуктопроводов.

6. Созданные методы, методики, алгоритмы и процедуры являются исчерпывающей методической основой для доработки и совершенствования строительных норм и правил, используемых при создании и эксплуатации трубопроводных систем, на базе современных вероятностных подходов к анализу прочности и конструктивной надежности.

Реализация результатов работы. Представленные в работе методики, процедуры, алгоритмы и рекомендации использованы в практике проектирования магистральных трубопроводов и трубопроводных систем в Открытом акционерном обществе «Институт по проектированию и исследовательским работам в нефтяной промышленности» (ОАО «Институт Гипровостокнефть») и на Государственном унитарном предприятии «Институт проблем транспорта энергоресурсов».

Предложенная методика комплексной оценки показателей надежности трубопроводных систем может использоваться при доработке нормативной документации проектирования продуктопроводов для экстремальных условий эксплуатации с учетом современных требований по обеспечению безопасности и снижению риска катастрофических разрушений.

Методические разработки, алгоритмы и процедуры, предложенные автором, используются в учебном процессе ГОУ ВПО «Самарский государствен-

ный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» при подготовке студентов по специальности 150301 – «Динамика и прочность машин».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях, совещаниях и симпозиумах: Межреспубликанской конференции «Повышение надежности машин и сооружений» (Киев, 1982 г.), Всесоюзной конференции «Проблемы оптимизации и надежности в строительной механике» (Вильнюс, 1983 г.), Всесоюзной конференции «Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов» (Москва, МАИ, 1983 г.), Всесоюзной конференции «Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов» (Куйбышев, 1986 г.), Всесоюзном научно-техническом симпозиуме «Нормирование прочности и ресурса высоконагруженных машин» (Владимир, 1986 г.), VI Всесоюзной конференции (Харьков, 1987 г.), III Всесоюзной конференции «Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов» (Казань, 1988 г.), Втором Российско-Китайском симпозиуме по космической науке и технике (Самара, 1992 г.), Восьмой международной конференции по разрушению материалов (Киев, 1993 г.), международном конгрессе и выставке американского общества инженеров-механиков (Детройт, 1993 г.), конференции американского общества инженеров-механиков по конструкционной усталости (Индианаполис, 1999 г.), международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин» (Москва, 2003 г.), Первой международной практической конференции «Обустройство и инфраструктура месторождений» (Москва, 2005 г.), II Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта» (Самара, 2005 г.), XXVI Российской школе по проблемам науки и технологий (Миасс, 2006 г.), 4-й Российской конференции «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность» (Геленджик, 2006 г.), научно-практической конференции «Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа» (Уфа, 2008 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 1 монография, 34 статьи в том числе 7 в изданиях, определенных ВАК РФ, 21 тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, основных результатов и выводов, списка используемой литературы из 248 наименований и одного приложения. Содержит 321 страницу текста, включая 94 рисунка, 45 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснована научная новизна и дается краткое описание содержания разделов диссертации.

В первом разделе проведен анализ традиционных подходов к оценке прочности и надежности технических систем, основанных на нормативном подходе и на детерминированных представлениях о природе эксплуатационных нагрузок и несущей способности конструкции. Нормативные подходы к расчетам прочности линейных частей трубопроводов, в том числе в ведущих в промышленном отношении странах, базируются на методах строительной механики, теории упругости и прочности конструкций и использовании концепции коэффициентов безопасности. Нормативные методы существенно упрощают решение многих задач, связанных с проектированием конструкций. Однако они имеют ряд недостатков. Во-первых, наблюдается традиционность в проектировании, что не позволяет совершенствовать показатели металлоемкости конструкции. Во-вторых, наблюдается нарушение системного подхода к проблеме. В существующих материалах основных отраслей техники отсутствуют явные количественные связи нормативных нагрузок и соответствующих поправочных коэффициентов с требуемой надежностью конструкций, которая оценивается лишь качественно. В-третьих, при реализации детерминистического нормативного подхода не могут быть в полном объеме учтены разнообразие условий эксплуатации трубопровода, сочетание различных факторов, статистический разброс механических свойств материала, геометрических параметров, начальная дефектность трубопровода. В ряде случаев, как например при анализе функционирования трубопровода в зоне сейсмического разлома, вследствие недостатка данных о действительных условиях эксплуатации и возможных размерах разлома, информация о них будет изначально носить статистический характер.

Указанные обстоятельства обуславливают повышение удельного веса вероятностных моделей при расчете прочности и надежности трубопроводов. Задача оценки прочности и надежности состоит в определении вероятности H того, что резерв несущей способности не будет исчерпан и в сопоставлении найденной вероятности с некоторым нормативным значением H^H , которое устанавливается на основании технико-экономических соображений, опыта проектирования и эксплуатации подобных технических систем и т.д. С учетом этих предположений автором получена зависимость между минимальным значением коэффициента безопасности f и условным коэффициентом запаса прочности η^{ysl} , связанным с H^H :

$$f = \frac{\eta^{ysl}}{\eta} \frac{1 - \alpha_{R^H} \mathcal{G}_{R^H}}{1 + \alpha_{N^H} \mathcal{G}_{N^H}}, \quad (1)$$

где α_{R^H} и α_{N^H} – доли отклонения нормативных несущей способности R^H и нагрузки N^H от их математических ожиданий $\langle R^H \rangle$ и $\langle N^H \rangle$, выраженные в долях средних квадратических отклонений; \mathcal{G}_{R^H} и \mathcal{G}_{N^H} – коэффициенты вариаций соответствующих величин.

Это значение коэффициента безопасности обеспечивает заданный уровень вероятности безотказной работы элемента конструкции. Показано, что

нормативный метод проектирования несущей способности конструкции, при котором нормируются величины коэффициентов безопасности, принципиально отличается от вероятностно-нормативного метода, при котором нормируется надежность конструкции.

Методы, используемые в настоящее время для количественной оценки показателей надежности, можно разделить на формальные математические и учитывающие физические причины отказов. Математические методы расчета надежности изложены в работах таких видных ученых, как А.И. Берг, Н.Г. Бруевич, Б.В. Гнеденко, В.И. Сифоров, Б.С. Сотсков и др. Это направление теории надежности продолжительное время было ведущим в связи с быстрым развитием радиоэлектронных систем, а также ракетной и вычислительной техники. В инженерной практике проектирования конструкций в основном используются методы теории надежности как вероятностной прочности. Систематическое изложение этих методов в отечественной литературе связано с работами Н.С. Стрелецкого, а дальнейшее развитие они получили в работах А.Р. Ржаницина, Я.Б. Шора, А. Фрейденталя и др., опубликованных в послевоенные годы. К этому же времени относится начало внедрения статистических методов в машиностроение, судостроение и другие области техники.

Последние десятилетия характеризуются резким повышением объема и уровня научных исследований в области надежности конструкций механических систем. Методы вероятностно-статистической оценки выносливости материалов, действующих нагрузок, расчета надежности и долговечности конструкций изложены в фундаментальных работах С.А. Алексеева, Б.В. Бойцова, В.Ф. Гладкого, Б.В. Гнеденко, В.Ф. Грибанова, А.С. Гусева, В.П. Когаева, А.А. Кузнецова, В.И. Куренкова, Н.А. Махутова, В.И. Перлика, Д.Н. Решетова, А.Р. Ржаницина, А.Ф. Селихова, С.В. Серенсена, М.Н. Степнова, Ю.Л. Тарасова, С.А. Тимашева, В.Т. Трощенко, а также зарубежных ученых В. Вейбулла, Т. Екобори, А.О. Пейна, А. Фрейденталя, М. Шинозуки и др. Наиболее общий подход к расчету надежности, основанный на теории множеств, предложен в 1959 году В.В. Болотиним и развит им в стройную общую теорию надежности, которая стала методологической основой проектирования сложных технических систем в различных отраслях народного хозяйства, таких как машиностроение, ракетостроение, строительство и т.д.

Комплексное решение проблемы надежности и долговечности конструкций возможно лишь с позиций общей теории надежности. Основу этой точки зрения составляют три важных момента. Во-первых, отчетливое понимание того факта, что и внешние условия эксплуатации (включая внешние нагрузки), и несущая способность конструкции в процессе эксплуатации суть случайные процессы. Поэтому при решении задачи оценки надежности необходимо привлекать аппарат теории случайных функций. Во-вторых, признание того, что выход конструкции из строя может быть обусловлен стохастическим процессом накопления усталостных повреждений или ростом усталостных трещин при нагрузках переменного уровня. Повреждения, достигнув определенной величины, начинают препятствовать нормальной эксплуатации конструкции. В-третьих,

необходимость учитывать возможность одновременного и взаимообусловленного появления как внезапных, так и постепенных отказов.

При исследовании надежности магистральных трубопроводов проводится структурный анализ, чтобы рассматривать их как систему, состоящую из отдельных элементов. Степень детализации при этом может быть различной, но в конечном итоге деление должно быть закончено на таком уровне, на котором характеристики надежности элементов либо известны по опыту их отработки в аналогичных изделиях, либо могут быть рассчитаны.

Элементы, составляющие продуктопровод, можно классифицировать следующими тремя типами:

1. Элементы первого типа не имеют в материале трещиноподобных дефектов и не допускают их образования при эксплуатации. Возникновение макротрещины в материале трактуется как отказ.

2. Элементы второго типа к моменту эксплуатации уже имеют начальные металлургические или технологические дефекты. При вычислении надежности таких элементов рассматривается процесс распространения исходной трещины. Достижение трещиной критической длины трактуется как отказ.

3. Элементы третьего типа не имеют начальных трещиноподобных дефектов, но их эксплуатация возможна с распространяющейся усталостной трещиной. При анализе надежности элементов этого типа рассматриваются две стадии усталостного разрушения. Сначала вероятность безотказной работы оценивается как для элементов первого типа, после образования усталостной макротрещины – как для элементов второго типа. Критерий отказа определяется так же, как и для элементов второго типа.

Таким образом, надежность линейной части магистрального трубопровода длиной L за период эксплуатации t с учетом разбиения на N групп однородных участков (элементов) может быть оценена по формуле

$$H(t, L) = \prod_{i=1}^N H_i(t, \Delta L_i), \quad (2)$$

где $H_i(t, \Delta L_i)$ – надежность i -ой однородной группы (элемента) суммарной протяженностью ΔL_i ($L = \sum_{i=1}^N \Delta L_i$). В формуле (2) предполагается независимость отказов на каждом из выделенных участков.

Для оценки надежности системы, состоящей из N последовательно соединенных элементов с коррелированными отказами, используется приближенная формула модели цепи

$$\frac{1}{H(t)} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{H_i(t)} - (N - 1). \quad (3)$$

Здесь $H(t)$ – надежность системы; $H_i(t)$ – надежность i -го элемента.

Было проведено исследование точности приближенной формулы (3) для модели, состоящей из двух фиктивных элементов, надежность каждого из которых определяется через нормальный закон распределения. При этом установлено, что даже при больших коэффициентах корреляции формула (3) дает хоро-

шие результаты. Формула модели цепи обеспечивает тем большую точность, чем больше величина надежности каждого фиктивного элемента. Это свидетельствует о применимости модели цепи при оценке вероятности безотказной работы высоконадежных элементов конструкций с учетом возможности двух видов отказов: внезапных и постепенных.

В данном разделе подробно описаны вычислительные особенности оценки надежности как вероятностной прочности при различных сочетаниях законов распределения несущей способности и эксплуатационной нагрузки. При выводе соответствующих соотношений рассматривались нормальный, логарифмически нормальный и экспоненциальный законы распределения, а также гамма-распределение и закон Вейбулла в различных сочетаниях. Когда нет оснований для принятия допущения о каком-либо конкретном распределении несущей способности или эксплуатационной нагрузки, но имеется достаточный объем эмпирических данных, предложено использовать графический метод определения вероятности безотказной работы.

Очевидным недостатком методов оценки надежности как вероятностной прочности является невозможность корректного учета фактора времени, поскольку несущая способность и эксплуатационная нагрузка здесь считаются не случайными процессами, а лишь случайными величинами в каждый данный момент времени.

В наиболее общем подходе, предложенном В.В. Болотиним, характеристиками надежности конструкции является вероятность невыброса случайного процесса за заданный уровень.

Требования, предъявляемые к таким ответственным энергетическим сооружениям, как магистральные нефтегазопроводы обуславливают разработку новых вопросов об их надежности, исходя из современных достижений науки. В первую очередь сюда необходимо отнести вопрос о прогнозировании показателей надежности, разработке алгоритмов их количественного описания для применения в проектировании. Аналитической основой решения задач оценки надежности конструкций магистральных трубопроводов являются методы исследований физики отказов и анализа надежности, расчетов на прочность и долговечность, развитые Х.А. Азметовым, В.А. Березиным, П.П. Бородавкиным, А.Г. Гумеровым, Р.С. Гумеровым, О.М. Иванцовым, Р.С. Зайнуллиным, М.Х. Султановым, В.В. Харионовским, Э.М. Ясиным и другими учеными.

В данном разделе подробно описываются применяемые в современной инженерной практике проектирования подходы к расчетной оценке показателей надежности, в том числе с использованием вероятностных моделей. Обеспечение безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов основано на применении средств технической диагностики, которые позволяют с достаточной точностью выявлять расположение, тип и размер повреждений стенок. Однако вопросы, связанные с определением реальной опасности обнаруженных дефектов, пока разработаны не в полной мере. Возникает неправомерная ситуация в сопоставлении приведенных данных о дефектах с нормами проектирования трубопроводов. Расчет трубопроводов на прочность при проектировании не учитывает возможность возникновения или развития дефектов в процессе экс-

плуатации (СНиП 2.05.06-85*), трубопроводы проектируются на основании российских и зарубежных норм как бездефектные сооружения. В разночтение со СНиП методики определения «допустимых» и «недопустимых» дефектов легализуют возможность иметь дефекты на бездефектном по расчету трубопроводе.

Другим важным аспектом, часто отмечаемым в публикациях, являются сложные природно-климатические условия, в которых во многих случаях эксплуатируются магистральные трубопроводы. К сложным условиям эксплуатации трубопроводов относятся пучение и просадка промерзающих, протаивающих грунтов, выпучивание (всплывание) участков трубопроводов, активизация деструктивных, эрозионных и оползневых процессов, а также обводнение и заболоченность трасс, наконец, сейсмическое воздействие.

В настоящее время длительность эксплуатации большинства действующих магистральных трубопроводов составляет примерно 20...30 лет. В связи с этим возникает необходимость оценки их технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Длительная эксплуатация трубопроводов приводит не только к появлению макродефектов, но и к изменению механических свойств металла труб и сварных соединений. Современные методы диагностики позволяют получать информацию о наличии макроповреждений, их размерах и местонахождении в трубе, однако нет полной ясности относительно закономерностей влияния времени эксплуатации магистральных трубопроводов на уровень вязкости стали, величина которой определяет степень опасности как исходных, так и накопленных в процессе эксплуатации дефектов.

Обзор существующих исследований, посвященных проблеме надежности конструкций трубопроводных систем, показывает, что, несмотря на большое количество работ по данной теме, ряд актуальных научных и практических вопросов остается нерешенным. В связи с этим анализ публикаций позволяет сделать следующие выводы:

1. В нормативных документах и практике проектирования отсутствует комплексный системный подход к количественной оценке показателей прочности и надежности трубопроводных систем. Отсутствуют универсальные методики оценки прочности и надежности трубопроводов, позволяющие учитывать влияние сложных природно-климатических условий прокладки и эксплуатации трубопроводных систем.

2. В современных методах оценки надежности продуктопроводов не учитывается тот факт, что их несущие способности и внешние воздействия являются случайными функциями времени. Отсутствуют методы схематизации внешних воздействий как функций времени.

3. Слабо разработаны вопросы, связанные с инженерной оценкой реальной опасности выявленных трещиноподобных дефектов в стенках трубопроводов.

4. Остается актуальной проблема определения остаточного ресурса и возможности его продления по результатам оценки текущего состояния линейной части магистральных трубопроводов.

5. Мало изучены вопросы, связанные с оценками устойчивого функционирования трубопроводов в зонах воздействия локальных разломов земной коры.

6. Трехмерная механика разрушения далека от завершения, недостаточно изучено распределение напряжений и деформаций в трубах с несквозными поверхностными трещинами, что ограничивает использование критериев механики разрушения для оценки работоспособности конструкций.

7. Нет работ, в которых при оценке надежности трубопроводов учитывалась бы зависимость характерного размера трещины в стенке трубы от времени.

8. Для трубопроводных систем не развиты подходы, позволяющие проводить одновременный учет внезапных и постепенных отказов.

Таким образом, несмотря на значительные успехи, достигнутые как в теоретических разработках, так и в практической реализации, в настоящее время нет достаточно эффективной комплексной методологии расчета количественных показателей надежности трубопроводных систем на этапе проектирования и эксплуатации.

Во втором разделе разработана общая схема оценки надежности элементов конструкций трубопроводных систем на основе приложения общей теории надежности к анализу трубопроводов.

Вероятность безотказной работы – функция надежности $H(t)$ – определяется как вероятность пребывания вектора качества $v(t)$ в допустимой области Ω_0 на отрезке времени $[0, t]$:

$$H(t) = P\{v(\tau) \in \Omega_0; \tau \in [0, t]\}. \quad (4)$$

Таким образом, общая схема оценки надежности конструкций трубопроводов с учетом физических и эксплуатационных аспектов сводится к последовательному выполнению четырех этапов.

Первый этап представляет собой схематизацию системы и внешних воздействий на нее. Здесь необходимо использовать понятийный и математический аппарат строительной механики, механики стержневых систем, теории упругости, теории пластин и оболочек и других разделов механики деформируемого твердого тела.

Второй этап заключается в выборе пространства качества V и области допустимых состояний Ω_0 . Этот выбор делается на основании анализа вида возможных отказов, технико-экономических соображений с учетом технологических и эксплуатационных требований.

Третий этап состоит в определении стохастического поведения системы по известным ее свойствам и при известных параметрах внешних случайных воздействий. Это первая, основная задача статистической динамики, методы решения которой выбираются в зависимости от свойств самой системы.

Наконец, на последнем этапе определяется функция надежности $H(t)$. Методы оценки вероятности безотказной работы выбираются в зависимости от числа прогнозируемых отказов, их вида и других факторов.

При схематизации конструкция рассматриваемого участка трубопровода представляется в виде системы соединенных между собой элементов. К одной

группе относятся элементы, для которых недопустимо появление дефектов и повреждений; к другой – элементы с дефектами (непровары, поры, растрескивание), которые могут возникнуть при изготовлении; к третьей – элементы, в которых трещиноподобные дефекты могут появиться в процессе эксплуатации (усталостные трещины). Расчет показателей надежности трубопровода как сложной системы проводится с учетом возможности постепенных отказов в результате длительного действия на нее нагрузок разного уровня (циклических случайных нагрузок) и внезапных отказов при действии максимальных нагрузок, возникающих при неблагоприятных, но вполне реальных условиях и режимах работы. Это учитывается путем схематизации элемента конструкции в виде модели из двух последовательно соединенных фиктивных элементов, под которыми подразумевается реальный элемент, имеющий лишь один вид отказа – внезапный или постепенный.

Конструктивная схема конкретной трубопроводной системы строится на основании структурного анализа, при котором трубопровод рассматривается как протяженная система, состоящая из однородных по способу прокладки, грунтово-геологическим, климатическим и эксплуатационным условиям участков. Для выделенной группы участков характерны отказы, имеющие одинаковую природу, причина отказа описывается одним и тем же критерием наступления предельного состояния. Состав и объем необходимой информации определяется и корректируется с учетом выбранных для реализации расчетных схем.

Нагрузки и воздействия на трубопровод условно можно разделить на две группы: функциональные и природно-климатические. Сведения о типах и уровнях функциональных нагрузок (внутреннее давление перекачиваемого продукта, регулируемые температурные воздействия и др.) необходимо принимать в соответствии с проектной документацией и имеющимися статистическими данными. Параметры природно-климатических нагрузок задаются на основе анализа принятых конструктивных и технологических решений, информации о трассе трубопровода, включающей основные природно-климатические характеристики регионов и принятых физических, механических и математических моделей рассматриваемых явлений. Расчетные нагрузки и воздействия на конструкцию трубопровода регламентируются СНиП.

На этапе выбора параметров состояний и определения области допустимых состояний Ω_0 необходимо принимать во внимание тип рассматриваемого конструктивного элемента, вид анализируемого отказа, критерий отказа, а также всю совокупность технологических и эксплуатационных требований к элементу, которую можно учесть при данном выборе параметра качества. Для элементов первого типа (т.е. элементов, для которых недопустимо появление дефектов и повреждений) целесообразно устанавливать прочностные или деформационные критерии внезапного разрушения и критерии накопления рассеянных повреждений до образования усталостных макротрещин. Для элементов второго и третьего типа (т.е. элементов, в которых дефекты могут появиться соответственно при изготовлении и эксплуатации) необходимо устанавливать критерии по трещиностойкости и живучести.

Определение области допустимых состояний Ω_0 подразумевает проведение комплексных экспериментальных исследований свойств конструкционных материалов, реализация которых ограничивается техническими и экономическими возможностями. Поэтому для учета влияния технологии изготовления элементов конструкций и условий эксплуатации разработана методика проведения экспериментальных исследований на основе методов теории планирования эксперимента.

Обоснованные рекомендации по выбору конструкционных материалов, оценка служебных свойств этих материалов, оценка влияния технологических и эксплуатационных факторов на их свойства немислимы без учета критериев механики разрушения. Вязкость разрушения конструкционных материалов изменяется в широких пределах, а с повышением вязкости разрушения обычно снижается прочность металла или его состояния после термообработки. Сопоставление различных материалов с целью выбора для конструкции на этапе проектирования целесообразно проводить по диаграммам сравнительного анализа в координатах $K_{Ic} - \sigma_{0,2}$.

Для обеспечения живучести и работоспособности силовых элементов при циклическом нагружении наряду с диаграммами сравнительного анализа необходимо использовать такие обобщенные графики, как зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений. Итак, наличие диаграмм сравнительного анализа и обобщенных кинетических диаграмм $dl/dN - \Delta K$ позволяет уже на стадии проектирования сделать рациональный выбор конструкционного материала с учетом технологических факторов и условий эксплуатации.

Следует отметить, что задача статистической динамики сводится к определению вероятностных характеристик параметров НДС (параметров механики разрушения) для участка трубопровода по известным законам распределения внешней нагрузки и свойств самой системы. Математическая задача статистической динамики формулируется следующим образом. Уравнение, описывающее поведение исследуемой системы, в общем случае представляется в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно выходных параметров u_1, u_2, \dots, u_n :

$$\frac{du_i}{dt} = F_i(t, u_1, u_2, \dots, u_n; q_1, q_2, \dots, q_m; r_1, r_2, \dots, r_s) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где F_i – некоторые линейные или нелинейные функции от указанных аргументов; q_1, q_2, \dots, q_m – случайные функции времени, характеризующие входные воздействия; r_1, r_2, \dots, r_s – случайные величины, моделирующие стохастические свойства системы.

Известны вероятностные характеристики случайных функций q_1, q_2, \dots, q_m и начальных условий $u_1(0), u_2(0), \dots, u_n(0)$ в виде моментов или законов распределения вероятности.

Выбрана система функционалов от выходных координат

$$\Phi_{\mu} [t, u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)] \quad (\mu = 1, 2, \dots).$$

Заданы функции $\chi_{\mu}(\Phi_{\mu})$ ($\mu = 1, 2, \dots$), определяющие форму вероятностных характеристик функционалов.

Требуется по заданной системе дифференциальных уравнений (5), заданным вероятностным характеристикам случайных функций q_1, q_2, \dots, q_m и случайных величин r_1, r_2, \dots, r_s ; $u_1(0), u_2(0), \dots, u_n(0)$ определить математические ожидания $\langle \chi_{\mu}(\Phi_{\mu}) \rangle$ ($\mu = 1, 2, \dots$).

Математические ожидания $\langle \chi_{\mu}(\Phi_{\mu}) \rangle$ в отдельных случаях могут выражать следующие вероятностные характеристики: математические ожидания выходных параметров; дисперсии выходных параметров; интегральные многомерные законы распределения выходных параметров; математические ожидания, дисперсии, интегральные законы для некоторых функций от выходных параметров и т.п.

Определение вероятности безотказной работы конструкции в конкретных прикладных ситуациях составляет серьезные трудности, поэтому нужно применять метод условных функций надежности, который основан на поэтапном решении задачи. В наиболее общем случае здесь считается, что процесс нагружения характеризуется некоторым вспомогательным случайным вектором s , а свойства системы – случайным вектором r . При этом известна совместная плотность вероятности этих величин $f_{rs}(r, s)$. На первом этапе полагается, что вектор нагружения $q(t/s)$ задан при фиксированных значениях s , а вектор r принимает определенное значение. Тогда функция надежности представляет собой, по существу, вероятность пребывания системы в допустимой области при условии, что параметры системы и параметры внешнего воздействия фиксированы. Будем называть найденную функцию $H(t/r, s)$ условной функцией надежности. На втором этапе, применив формулу полной вероятности, можно найти безусловную вероятность безотказной работы на множестве всех возможных значений r и s :

$$H(t) = \iint_{D(r,s)} H(t/r, s) f_{rs}(r, s) dr ds. \quad (6)$$

Общие подходы и конкретные зависимости для определения функции надежности зависят от вида и модели возможного отказа силового элемента конструкции.

Подавляющее большинство отказов связано с постепенным накоплением повреждений (пластических деформаций, усталостных повреждений, износа и т.п.). Математическим отражением этого факта являются кумулятивные модели отказов, которые описывают квазимонотонное ухудшение параметров качества системы, происходящее в процессе ее эксплуатации и взаимодействия с окружающей средой. Примером кумулятивного процесса может служить любой процесс накопления повреждений, происходящий без естественного или искус-

ственного (ремонт, восстановление) залечивания. Так, согласно линейной модели накопления усталостных повреждений условие разрушения вводится как

$$\sum_j \frac{n(\sigma_j)}{N(\sigma_j)} = \widehat{D}_c. \quad (7)$$

Здесь $n(\sigma_j)$ – число циклов нагружения в эксплуатации с характерным параметром нагрузки σ_j (например, максимальным напряжением цикла); $N(\sigma_j)$ – предельное число циклов при испытании с заданным характерным параметром σ_j ; \widehat{D}_c – критическое повреждение.

В третьем разделе сделан подробный анализ существующих аналитических и численных методов решения задач статистической динамики, выбор которых определяется видом системы и типом внешних воздействий, и описана принятая методика определения вероятностных характеристик поведения конструкции трубопровода при случайных воздействиях. В инженерной практике для расчета сложных конструкций обычно применяют численные методы, хорошо приспособленные к расчетам на ЭВМ: метод статистических испытаний (Монте-Карло), метод эквивалентных возмущений и интерполяционный метод. Метод интерполяционных полиномов В.И. Чернецкого лишен недостатков, присущих методам Монте-Карло и эквивалентных возмущений. Для достижения высокой точности решения задачи статистической динамики здесь необходимо небольшое число интегрирований дифференциальных уравнений, и весь процесс вычислений в рамках метода легко формализуется, что дает реальную и эффективную возможность компьютерного моделирования.

Основная расчетная формула интерполяционного метода имеет вид

$$\langle \chi_\mu \rangle = \sum_{k=1}^q \chi_\mu(\Phi_{\mu k}) \rho_k. \quad (8)$$

Здесь $\Phi_{\mu k} = \Phi_\mu(t, r_{1k_1}, r_{2k_2}, \dots, r_{mk_m})$ – значение функционала от выходных координат в узле интерполяции k ; $\rho_k = \prod_{j=1}^m \rho_{k_j}$ – число Кристоффеля, соответствующее

узлу интерполяции k ; $q = q_1 q_2 \dots q_m$ – общее число узлов интерполяции; текущий номер узла интерполяции k находится соответствующим перебором индексов k_1, k_2, \dots, k_m . Оптимальный выбор узлов интерполяции r_{jk_j} и чисел Кристоффеля ρ_{k_j} определяется функцией плотности вероятности входной случайной величины r_j и соответствующей системой ортогональных полиномов относительно веса $f_j(r_j)$. Для «стандартных» законов распределения $f(r)$ узлы интерполяции и значения чисел Кристоффеля приведены в справочниках. Для других законов используется так называемое ψ -преобразование:

$$r = \psi(x), \quad (9)$$

которое строится с помощью равенства

$$F_x(x) = F_r(r), \quad (10)$$

где $F_x(x)$ и $F_r(r)$ – интегральные законы соответственно случайной величины x со стандартной формой распределения и величины r , имеющей заданную плотность $f(r)$. Разрешая это уравнение относительно r , можно получить требуемую функцию $\psi(x)$.

Для представления входных случайных процессов предлагается использовать неканоническое разложение в сочетании с методом интерполяционных полиномов. При этом k -я реализация случайного процесса $x(t)$ записывается в виде

$$x_k(t) = \langle x(t) \rangle + \gamma_{k_1} \sin \omega_{k_3} t + \delta_{k_2} \cos \omega_{k_3} t, \quad (11)$$

где $\gamma_{k_1}, \delta_{k_2}, \omega_{k_3}$ – значения независимых случайных величин γ, δ, ω в узлах интерполирования; номер k определяется соответствующим перебором индексов k_1, k_2 и k_3 . Поскольку законы распределения случайных величин γ и δ здесь могут быть произвольными с параметрами $\langle \gamma \rangle = \langle \delta \rangle = 0, D_\gamma = D_\delta = D_x$, то целесообразно задавать их нормальными. В этом случае функция плотности вероятности случайной величины ω определяется выражением

$$f(\omega) = \frac{2}{\pi D_x} \int_0^\infty K_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \frac{\widehat{S}_x(\omega)}{D_x}. \quad (12)$$

Здесь D_x – дисперсия; $K_x(\tau)$ – корреляционная функция; $\widehat{S}_x(\omega)$ – спектральная плотность исходного стационарного случайного процесса $x(t)$.

Реальный широкополосный случайный процесс можно схематизировать суперпозицией n процессов, имеющих типовые спектральные плотности с одним максимумом. При этом приближенные значения корреляционной функции процесса определяются по отдельным его реализациям с использованием зависимости

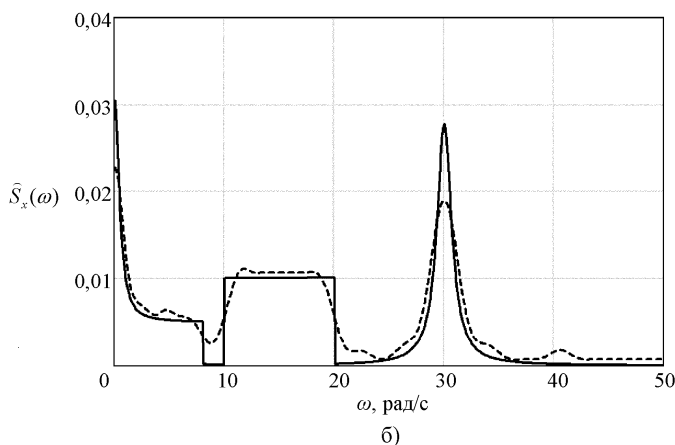
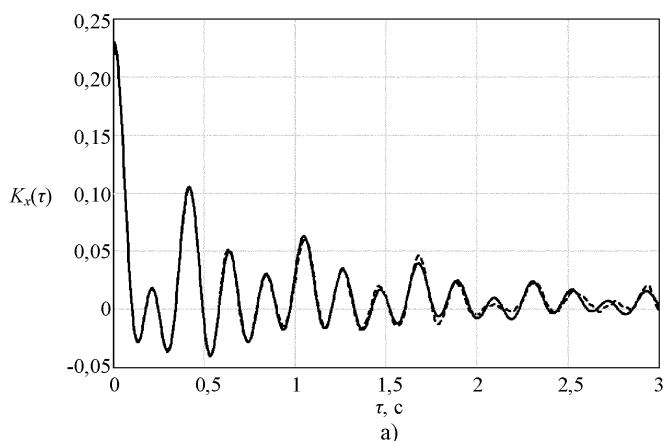
$$K_x^n(\tau) = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{k_1=1}^{q_{i1}} \sum_{k_2=1}^{q_{i2}} \sum_{k_3=1}^{q_{i3}} \delta_{i_{k_2}} \left(\gamma_{i_{k_1}} \sin \omega_{i_{k_3}} \tau + \delta_{i_{k_2}} \cos \omega_{i_{k_3}} \tau \right) \rho_{k_1} \rho_{k_2} \rho_{k_3} \right\}. \quad (13)$$

Сглаженная оценка спектральной плотности находится по дискретным значениям корреляционной функции:

$$\widehat{S}_x^n(\omega) = \frac{2}{\pi} \Delta t \sum_{r=0}^{L-1} K_{xr} \Omega(r) \cos(\omega r \Delta t). \quad (14)$$

Здесь Δt – шаг дискретизации корреляционной функции по времени; $K_{xr} = K_x(r \Delta t)$ – дискретные значения корреляционной функции; $\Omega(r) = 0,5[1 + \cos(\pi r/L)]$ – сглаживающее «окно» Тьюки; L – точка отсечения «окна».

На рис. 1 приведены результаты для случайного процесса сложной структуры, полученного суперпозицией четырех узкополосных процессов. Анализ результатов показывает, что надлежащим выбором числа узлов интерполяции случайных величин γ, δ и ω неканонического разложения можно добиться достаточно точного представления реализаций узкополосных процессов и случайных процессов сложной структуры. Это доказывает приемлемость принципа суперпозиции при моделировании реализаций.



— — теоретические значения
 - - - - - рассчитанные значения

Рисунок 1 – Корреляционная функция (а) и спектральная плотность (б)

обычно выбираются те величины, которые оказывают наибольшее влияние на НДС конструкции. За такие параметры здесь приняты рабочее давление (нормальный закон), температурный перепад (равномерный закон), толщина стенки трубы в наиболее опасном сечении (нормальный закон) и модуль упругости материала трубы (равномерный закон).

Для элемента конструкции, не имеющего и не допускающего появления

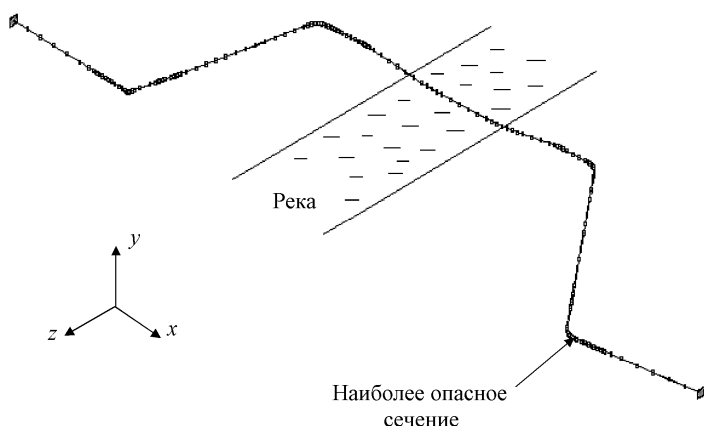


Рисунок 2 – Расчетная схема трубопровода

В качестве примера решения задачи статистической динамики рассмотрен участок реального магистрального подземного нефтепровода в районе перехода через реку, схема которого представлена на рис. 2. Общая протяженность моделируемой линейной части составляет почти 7 км.

В данном случае расчет НДС трубопровода выполняется по программе AutoPIPE с использованием стандарта на нефтепроводы ASME B31.4. Он позволяет выявить наиболее опасное сечение, в котором коэффициент отношения максимального в сечении рассчитанного нормативного напряжения к допускаемому достигает наибольшего значения.

Далее проводится сравнительный анализ двух численных методов решения задачи статистической динамики: Монте-Карло и интерполяционных полиномов. Следует отметить, что в качестве входных случайных параметров

обычно выбираются те величины, которые оказывают наибольшее влияние на НДС конструкции. За такие параметры здесь приняты рабочее давление (нормальный закон), температурный перепад (равномерный закон), толщина стенки трубы в наиболее опасном сечении (нормальный закон) и модуль упругости материала трубы (равномерный закон). Для элемента конструкции, не имеющего и не допускающего появления трещин, при внезапном отказе за параметр качества принято напряжение по Мизесу и нормативное напряжение по стандарту ASME B31.4.

В таблицах 1 и 2 представлены числовые характеристики выходных случайных величин, определенные соответственно методами Монте-Карло и интерполяционных полиномов при различном числе реализаций.

Таблица 1 – Метод Монте-Карло

| Число реализаций | Напряжение по Мизесу | | Нормативное напряжение | |
|------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|
| | Математическое ожидание, МПа | Среднее квадратическое отклонение, МПа | Математическое ожидание, МПа | Среднее квадратическое отклонение, МПа |
| 100 | 217,3 | 29,0 | 243,9 | 30,2 |
| 200 | 219,6 | 27,9 | 246,5 | 29,4 |
| 300 | 221,1 | 27,4 | 247,9 | 28,7 |
| 400 | 219,8 | 28,4 | 246,7 | 29,8 |
| 500 | 219,5 | 28,7 | 246,5 | 30,2 |
| 600 | 218,3 | 28,1 | 245,3 | 29,6 |
| 700 | 218,3 | 27,9 | 245,3 | 29,4 |

Таблица 2 – Метод интерполяционных полиномов

| Число узлов | Напряжение по Мизесу | | Нормативное напряжение | |
|-------------|------------------------------|--|------------------------------|--|
| | Математическое ожидание, МПа | Среднее квадратическое отклонение, МПа | Математическое ожидание, МПа | Среднее квадратическое отклонение, МПа |
| 2x2x2x2 | 217,1 | 28,6 | 243,9 | 29,9 |
| 3x3x3x3 | 217,1 | 28,3 | 243,8 | 29,7 |

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что при оценке надежности трубопроводных систем решение задачи статистической динамики целесообразно проводить методом интерполяционных полиномов. Он по сравнению с методом Монте-Карло дает возможность примерно в десять раз сократить необходимое количество расчетов, сохраняя при этом требуемую точность получаемых результатов.

В четвертом разделе описана методика и приведены процедуры оценки надежности элементов конструкций, не допускающих эксплуатацию с трещиноподобными дефектами.

За внезапный отказ таких элементов принимается потеря несущей способности, а за параметр состояния – напряжение или деформация в наиболее нагруженной точке (или сечении) элемента конструкции трубопровода. При этом функция надежности формулируется в виде

$$H(t) = P\{\sigma_{\text{экв}}(\tau) < \sigma_{\text{пр}}(\tau); \tau \in [0, t]\}, \quad (15)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – определяемое по одной из теорий прочности эквивалентное напряжение; $\sigma_{\text{пр}}$ – предельное напряжение.

Определение функции надежности по формуле (15) сводится к нахождению вероятности случайного события, состоящего в том, что за заданный промежуток времени $[0, t]$ не произойдет ни одного положительного пересечения процессом $v(t)$ уровня v_* . Эта вероятность вычисляется через среднее число выбросов в единицу времени, которая в свою очередь выражается через двумерную функцию плотности вероятности процесса изменения качества $v(t)$ и его производной $\dot{v}(t)$:

$$v_+(\Gamma, t) = \int_{\Gamma} dt \int_{\dot{v}_n > 0} f(v_*, \dot{v}, t) \dot{v}_n dv, \quad (16)$$

где \dot{v}_n – нормальная составляющая производной процесса; предельное значение v_* берется на граничной поверхности Γ . Методика вычисления среднего числа выбросов в единицу времени при решении прочностных задач достаточно подробно изложена в работах целого ряда исследователей.

За постепенный отказ элементов конструкций, не допускающих эксплуатацию с трещиноподобными дефектами, принимается момент образования усталостной макротрещины характерной длины l_* . Согласно основному свойству кумулятивных моделей вектор качества системы квазимоноotonно приближается к границе допустимой области так, что вероятность его не выхода из допустимой области на любом отрезке совпадает с вероятностью его нахождения в этой области в момент времени t . Таким образом, при постепенном отказе выражение для функции надежности можно представить в виде

$$H(t) = P\{\widehat{D}(t) < \widehat{D}_c\}, \quad (17)$$

где $\widehat{D}(t)$ – наибольшее накопленное усталостное повреждение к моменту времени t ; \widehat{D}_c – критическое повреждение, соответствующее образованию усталостной макротрещины длиной l_* . Обычно полагают, что $\widehat{D}_c = 1$, а в начальный момент времени (т.е. для бездефектного элемента) $\widehat{D}(0) = 0$.

Функция надежности (17) связана с вероятностью образования усталостных макротрещин за время t соотношением

$$H(t) = 1 - P(t). \quad (18)$$

Получение зависимости $P(t)$ не вызывает никаких затруднений, если известна обратная зависимость $T(P)$. Для определения времени T до образования усталостной макротрещины с заданной вероятностью используется линейная гипотеза суммирования усталостных повреждений:

$$T(P) = \frac{2\pi\widehat{D}_c}{\omega_e} \left[\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma)d\sigma}{N(P,\sigma)} \right]^{-1}. \quad (19)$$

Здесь σ – амплитуда характерного напряжения в опасной точке (сечении) элемента; $f(\sigma)$ – функция плотности вероятности распределения амплитуд случайного процесса нагружения; σ_{\min} , σ_{\max} – минимальное и максимальное значения амплитуд процесса нагружения; ω_e – эффективная частота случайного процесса нагружения, определяемая через спектральную плотность процесса; $N(P,\sigma)$ – зависимость, описывающая кривую усталости рассматриваемого конструктивного элемента по моменту образования макротрещины с вероятностью P при гармоническом нагружении с частотой $\omega_e/2\pi$.

Кривые усталости $N(P,\sigma)$ аппроксимируются степенными функциями, а определение $f(\sigma)$ проводится с помощью известных методов схематизации случайных процессов. Интегрирование (19) при различных значениях P позволяет получить функцию распределения долговечности $P = P(T)$ и затем по формуле (18) вычислить функцию надежности.

Для расчетно-экспериментального определения кривых усталости по образованию макротрещин целесообразно использовать положения модифицированной статистической теории «слабого звена», которая позволяет существенно увеличить представительность экспериментальных данных. На базе экспериментальной информации об усталостных характеристиках в условиях эксплуатации лабораторных образцов из данного материала осуществляется расчет функций распределения пределов ограниченной выносливости для других образцов и конструктивных элементов. Основное уравнение этой теории имеет вид

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \int_{F_u} \left(\frac{\varphi(\sigma) - u}{\sigma_0} \right)^m \frac{dF}{F_0} \right]. \quad (20)$$

Найденные из решения системы нелинейных уравнений параметры u, m, σ_0 являются исходными данными при расчете кривых усталости по моменту образования усталостных макротрещин в конструктивном элементе. Значения u_j, m_j, σ_{0j} ($j=1,2,\dots,L$) поочередно подставляются в уравнение (20), которое решается относительно σ при заданной вероятности P . В результате вычислений определяются значения предела ограниченной выносливости вероятности P конструктивного элемента σ_{jP} на базовой долговечности N_j ($j=1,2,\dots,L$).

Далее осуществляется аппроксимация кривой усталости в виде степенной зависимости:

$$\sigma^{\alpha_P} N = \sigma_{-1}^{\alpha_P} N_* = C_P \quad \text{при } \sigma > \sigma_{-1}; \quad N = \infty \quad \text{при } \sigma \leq \sigma_{-1}. \quad (21)$$

Здесь α_P и C_P – определяемые методом наименьших квадратов параметры, зависящие от свойств материала, вида напряженного состояния в конструктивном элементе, условий эксплуатации и т.п.; σ_{-1} – условный предел выносливости.

Таким образом определяются все необходимые данные для расчета надежности элементов конструкций по формулам (19) и (18). Схема оценки надежности представлена на рис. 3.

В пятом разделе описана разработанная методика количественной оценки надежности трубопроводных систем, допускающих безопасное использование с эксплуатационными и технологическими трещиноподобными дефектами. Очагами зарождения трещин являются концентраторы напряжений заводского, строительного

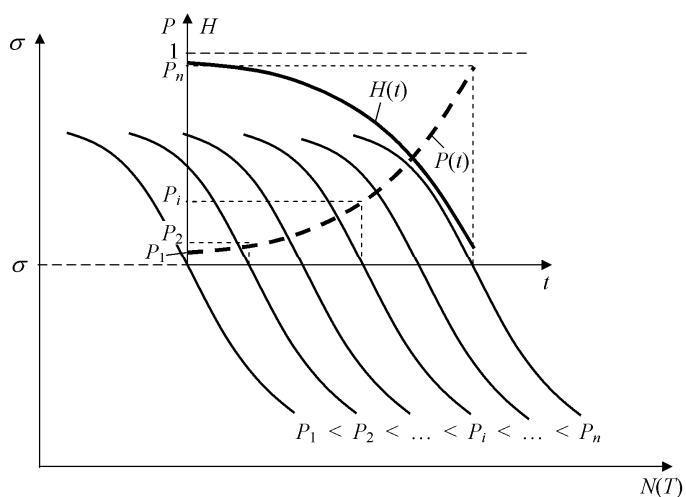


Рисунок 3 – Схема оценки надежности при постепенном отказе

монтажного или эксплуатационного происхождения. Для трубопроводов наибольший интерес представляют несквозные и, в первую очередь (учитывая сравнительно малую толщину стенки трубы), поверхностные трещины. Очевидно, что такие дефекты имеют трехмерный характер и в общем случае являются многопараметрическими. При неполноте информации о дефекте, а также для упрощения расчета здесь целесообразно использовать аппроксимацию его трещиной полуэллиптической формы.

Для трехмерных дефектов параметры механики разрушения в общем случае могут изменяться вдоль фронта трещины. Поэтому для них необходимо проверять выполнение критерия разрушения в нескольких точках, расположенных на границе дефекта. Для поверхностных трещин полуэллиптической формы, описываемых двумя параметрами (глубиной l и полудлиной a), можно ограничиться вычислением параметров механики разрушения в точках A , B и/или C (рис. 4).

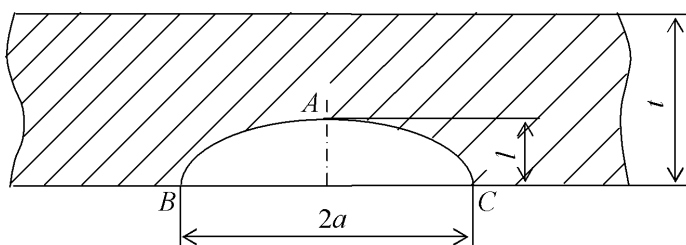


Рисунок 4 – Схематизация несквозной трещины

многих факторов – случайными функциями. Таким образом, условие безотказной работы примет вид

$$H(t) = P\{J(\tau) < J_c; \tau \in [0, t]\}. \quad (22)$$

Случайный процесс изменения величины J -интеграла удобно представить в виде канонического разложения.

Введя в рассмотрение дополнительную функцию $z(t) = J(t) - J_c$, оценку надежности при внезапном отказе можно произвести через среднее число положительных пересечений в единицу времени процессом $z(t)$ нулевого уровня:

$$H(t) = \exp \left[- \int_0^t \nu_+(0, \tau) d\tau \right]. \quad (23)$$

Дефекты в виде трещин, возникающие в элементах конструкций на стадии производства или при эксплуатации продуктопроводов, развиваются в течение определенного периода времени, который определяет живучесть конструкции. Из-за особенностей эксплуатации магистральных трубопроводов и поскольку для них характерно наличие несквозных поверхностных дефектов, разрушение конструкции происходит при прорастании трещины на всю толщину стенки трубы.

Уравнение, определяющее поцикловую скорость роста усталостных трещин, в общем виде можно представить следующим образом:

$$dl/dN = \varphi(\sigma, l, \Delta K, r_1, r_2, \dots, r_s), \quad (24)$$

где dl/dN – скорость роста трещины; σ – амплитуда номинальных напряжений; l – текущая длина трещины; $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ – размах коэффициента интенсивности напряжений за рассматриваемый цикл нагружения; r_1, r_2, \dots, r_s – параметры, характеризующие условия эксплуатации, геометрические параметры конструктивного элемента, физические свойства материала.

Модель постепенного отказа здесь является кумулятивной. Поэтому для функции надежности следует записать

$$H(t) = P\{l(t) < l_c; K_{\max}(\tau) < K_{fc}; \tau \in [0, t]\}, \quad (25)$$

где l_c – критическая длина трещины, равная толщине стенки трубы; K_{fc} – циклическая вязкость разрушения.

Оценку функции надежности при постепенном отказе можно проводить по приближенной формуле модели цепи (3), в которой

$$H_1(t) = P\{l(t) < l_c\}; \quad H_2(t) = P\{K_{\max}(\tau) < K_{fc}; \tau \in [0, t]\}. \quad (26)$$

В предлагаемой методике пошагового вычисления значений функции надежности решение задачи статистической динамики – определение параметров качества системы $l(t)$ и $K(t)$ – выполняется методом интерполяционных полиномов. При этом случайный стационарный процесс нагружения $N(t)$ с заданной спектральной плотностью $\hat{S}_N(\omega)$ представляется неканоническим разложением (11), а поцикловая скорость роста усталостной трещины полностью определяется соотношением типа (24). Вычисления здесь продолжаются до тех пор, пока функция надежности $H(t)$ не станет меньше некоторой, наперед заданной величины H^n .

В данном разделе изложены также особенности решения задач механики разрушения с помощью МКЭ-пакета ANSYS. Оно включает в себя выполнение линейно-упругого или упругопластического анализа и использование специальных постпроцессорных команд или макросов для вычисления требуемых параметров. При этом рассматриваются два главных этапа данной процедуры: моделирование области трещины; вычисление параметров механики разрушения. Для удобства моделирования несквозных поверхностных трещин разработана программа-макрос, позволяющая автоматически строить объемные сингулярные элементы (со смещенными на четверть длины стороны промежуточными узлами) вокруг фронта трещины. Кроме того, составлена программа-макрос для вычисления значений J -интеграла в точках вдоль фронта трехмерного дефекта.

С использованием МКЭ-пакета ANSYS и разработанной методики моделирования трещин выполнен вычислительный эксперимент по определению коэффициентов интенсивности напряжений для наиболее применяемых на территории Российской Федерации типоразмеров труб с учетом возможного наличия в них осевых и окружных (наружных и внутренних) трещин. Показано, что зная величину рабочего давления p и локальных осевых напряжений σ , расчет коэффициентов интенсивности напряжений для труб с осевой и окружной трещиной можно выполнять соответственно по формулам

$$K_I = M_p \frac{pR_{cp}}{t} \sqrt{\pi l}; \quad K_I = M_\sigma \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (27)$$

где R_{cp} – средний радиус трубы.

Из анализа результатов расчета видно, что безразмерные коэффициенты M_p и M_σ являются инвариантными как по отношению к диаметру трубы, так и к толщине ее стенки. Для определения этих коэффициентов в точках A и B фронта трещины (см. рис. 4) в зависимости от отношений l/a и l/t составлены специальные таблицы.

В шестом разделе приведены практические примеры количественной оценки вероятности безотказной работы элементов конструкций трубопроводов в соответствии с предложенной комплексной методикой вычисления показателей надежности.

Методика оценки безопасности перехода подземного трубопровода через сейсмический разлом на стадии проектирования рассматривается на примере газопровода диаметром 48 дюймов (1219 мм), изготовленного из стали X70. Толщина стенки трубы обычной секции составляет 17,6 мм. На участке пересечения разлома толщина стенки увеличена до 25,3 мм. Длина этой специальной секции равна 72 м. В месте пересечения разлома предусмотрена специальная траншея с материалами-заменителями (рис. 5).

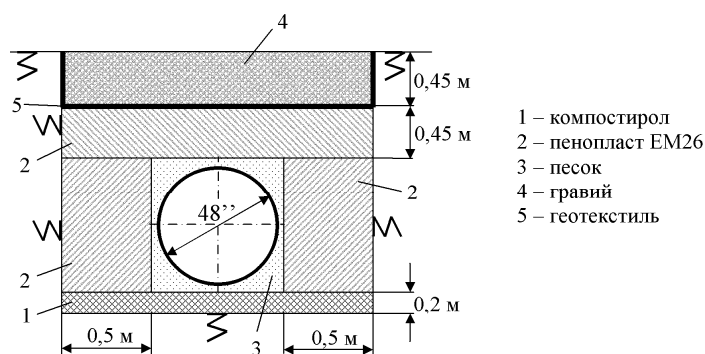


Рисунок 5 – Конфигурация специальной траншеи повторяемости землетрясений в 1000 лет приняты равными: $u_{xp} = -457,5$ мм; $u_{yp} = u_{zp} = 915$ мм.

В соответствии с мировой практикой проектирование трубопровода в случае сейсмической опасности должно проводиться на основе двухуровневого подхода с целью выполнения следующих требований:

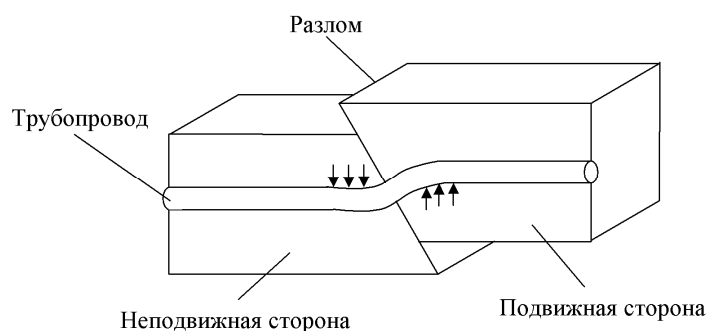


Рисунок 6 – Движение по разлому

Основными для данной трубопроводной системы являются нагрузки, обусловленные движением по разлому, вызванным сейсмическими толчками (рис. 6). Эти сейсмические смещения должны прикладываться к подвижной стороне разлома. Сейсмические смещения в системе координат трубы для периода

1) трубопровод должен выдерживать воздействие проектного землетрясения (SLE) без или с минимальными перерывами в нормальной эксплуатации без необходимости проведения значительных ремонтных работ;

2) трубопровод должен выдерживать воздействие максимального расчетного землетрясения (DLE) без разрывов. В случае такого события трубопроводу могут быть нанесены значительные повреждения, в результате которых будет прервана эксплуатация и для устранения которых потребуется провести ремонтные работы в одном или нескольких местах.

Периоды повторяемости проектного землетрясения (SLE) и максимального расчетного землетрясения (DLE) приняты равными соответственно 200 и 1000 годам.

Решение рассматриваемой задачи проводится в геометрически и физически нелинейной статической постановке, т.е. с учетом больших перемещений, пластических деформаций и нелинейности поведения окружающего трубу грунта. Здесь применяется МКЭ-пакет ANSYS, в котором для моделирования упругопластического деформирования трубопровода предусмотрен специальный элемент трубы PIPE20, а для дискретного представления точек грунта можно воспользоваться элементом нелинейной пружины COMBIN39. При этом каждый узел трубы, находящейся в грунте, необходимо связать с неподвижной опорой с помощью трех элементов-пружин, представляющих жесткости грунта в продольном, поперечных горизонтальном и вертикальном направлениях. На подвижной стороне заданные сейсмические смещения по разлому прикладываются к свободным концам элементов-пружин, имитирующих действие грунта.

В таблице 3 представлены используемые критерии, допускаемые и наибольшие по модулю рассчитанные значения для землетрясения DLE (где ε_b – деформация изгиба трубы; $\varepsilon_{M_{\max}}$ – деформация, соответствующая максимуму на кривой «момент – деформация»; ε_{ac} – осевая (фибровая) деформация сжатия; ε_w – деформация сжатия, при которой начинается гофрообразование; ε_{at} – осевая (фибровая) деформация растяжения). Как показывают результаты детерминированного расчета, все проектные требования выполнены. При этом минимальный коэффициент запаса прочности равен 1,5.

Таблица 3 – Результаты детерминированного расчета (DLE)

| Тип разрушения | Предельные растягивающие деформации (при изгибе) | Разрушение при сжатии / гофрообразование | Разрушение сварных швов |
|------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| Критерий | $\varepsilon_b \leq 0,04$ (4,0%) | $\varepsilon_{ac} / \varepsilon_w \leq 1,0$ | $\varepsilon_{at} \leq 0,04$ (4,0%) |
| Допускаемое значение | 4,0% | $\varepsilon_w = -1,87\%$ | 4% |
| Рассчитанное значение | $\varepsilon_b = 0,76\%$ | $\varepsilon_{ac} = -1,27\%$ | $\varepsilon_{at} = 0,26\%$ |
| Коэффициент запаса прочности | 5,3 | 1,5 | 15,4 |

Для решения задачи статистической динамики используется метод интерполяционных полиномов. В качестве входных случайных данных здесь выбраны пять величин, оказывающих наибольшее влияние на НДС трубопровода, основными из которых являются сейсмические смещения по разлому. За выходные случайные величины приняты деформации ε_b , ε_{ac} и ε_{at} .

Согласно теории В.В. Болотина для вычисления функций безопасности $B(t)$ и риска $R(t) = 1 - B(t)$ случайные события, являющиеся потенциальным ис-

точником аварийной ситуации, разбиваются на классы $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$, которые могут отличаться уровнем интенсивности воздействий, иметь различные источники или различную физическую природу. Если все m классов редких событий образуют независимые пуассоновские потоки, интенсивности которых λ_j в общем случае различны, то для оценки риска можно воспользоваться следующей приближенной формулой:

$$R(t) \approx \sum_{j=1}^m \lambda_j t R(\Phi_j), \quad (28)$$

где

$$R(\Phi_j) = 1 - B(\Phi_j).$$

Здесь $B(\Phi_j)$ – условная безопасность, равная вероятности того, что авария не наступит при осуществлении события $E \in \Phi_j$. Для землетрясений обратные величины $\theta_j = 1/\lambda_j$ имеют смысл периода повторяемости.

В рассматриваемом случае $m = 2$, поскольку расчет выполняется на два типа сейсмических воздействий SLE и DLE. Таким образом,

$$R(t) = [\lambda_{\text{SLE}} R(\Phi_{\text{SLE}}) + \lambda_{\text{DLE}} R(\Phi_{\text{DLE}})]t, \quad (29)$$

где

$$R(\Phi_{\text{SLE}}) = 1 - B(\Phi_{\text{SLE}}); \quad R(\Phi_{\text{DLE}}) = 1 - B(\Phi_{\text{DLE}}),$$

причем $\theta_{\text{SLE}} = 200$ лет; $\theta_{\text{DLE}} = 1000$ лет; $\lambda_{\text{SLE}} = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/ГОД; $\lambda_{\text{DLE}} = 10^{-3}$ 1/ГОД.

Учитывая, что вектор качества системы квазимоноотонно приближается к границам допустимых областей, следует записать

$$B(\Phi_{\text{SLE}}) = \min \left(\begin{array}{l} P\{\varepsilon_b(t_{\text{SLE}}) < 0,9\varepsilon_{M \max}\}, \\ P\{|\varepsilon_{ac}(t_{\text{SLE}})| < 0,8|\varepsilon_w|\}, \\ P\{\varepsilon_{at}(t_{\text{SLE}}) < 2\%\} \end{array} \right); \quad B(\Phi_{\text{DLE}}) = \min \left(\begin{array}{l} P\{\varepsilon_b(t_{\text{DLE}}) < 4\%\}, \\ P\{|\varepsilon_{ac}(t_{\text{DLE}})| < |\varepsilon_w|\}, \\ P\{\varepsilon_{at}(t_{\text{DLE}}) < 4\%\} \end{array} \right). \quad (30)$$

Входящие в эти выражение вероятности легко находятся с помощью функций распределения соответствующих выходных параметров.

На рис. 7 изображена функция распределения деформации ε_{ac} для землетрясения DLE, рассчитанная при выборе для каждой входной случайной величины по два узла. Видно, что вероятность выполнения критерия прочности при сжатии (гофрообразовании) для землетрясения DLE $P\{|\varepsilon_{ac}(t_{\text{DLE}})| < |\varepsilon_w|\}$ составляет всего 62,5%. Таким образом, $B(\Phi_{\text{DLE}}) = 0,625$, а для землетрясения SLE можно принять, что $B(\Phi_{\text{SLE}}) \approx 1$. Функция полной безопасности представлена на рис. 8. Как видно из графика, например, для трубопровода со сроком службы $T = 40$ лет безопасность составляет 0,985.

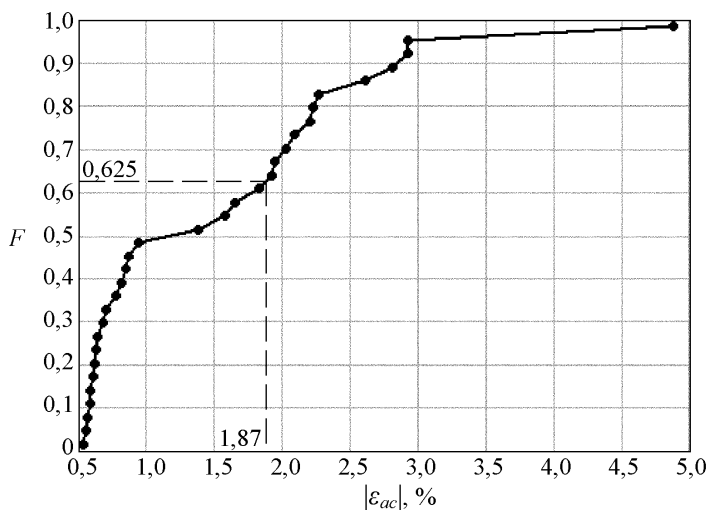


Рисунок 7 – Функция распределения деформации ε_{ac} (DLE)

Видно, что вероятность выполнения критерия прочности при сжатии (гофрообразовании) для землетрясения DLE $P\{|\varepsilon_{ac}(t_{\text{DLE}})| < |\varepsilon_w|\}$ составляет всего 62,5%. Таким образом, $B(\Phi_{\text{DLE}}) = 0,625$, а для землетрясения SLE можно принять, что $B(\Phi_{\text{SLE}}) \approx 1$. Функция полной безопасности представлена на рис. 8. Как видно из графика, например, для трубопровода со сроком службы $T = 40$ лет безопасность составляет 0,985.

Методика оценки живучести (остаточного ресурса) в процессе эксплуатации рассматривается на примере резервуара при наличии поверхностной трещины в зоне врезки патрубка.

Для определения нагрузок, действующих на патрубки резервуара со стороны присоединяемых к нему надземных трубопроводных систем, построены их балочные конечно-элементные модели с использованием программы AutoPIPE (рис. 9).

Резервуар для нефти и нефтепродуктов (типовой проект ТП 704-1-171-184) представляет собой стальную вертикальную цилиндрическую конструкцию емкостью 20000 м³ со стационарной крышей. Построенная в программе ANSYS с использованием конечных элементов оболочки SHELL63 модель резервуара представлена на рис. 10. На рассматриваемую конструкцию действует следующая система нагрузок: сила тяжести от собственной массы конструкции; погонная нагрузка от массы крыши и снегового покрова; гидростатическое давление продукта, изменяющееся по линейному закону по высоте резервуара; тепловое расширение; усилия на патрубки со стороны присоединяемых трубопроводов.

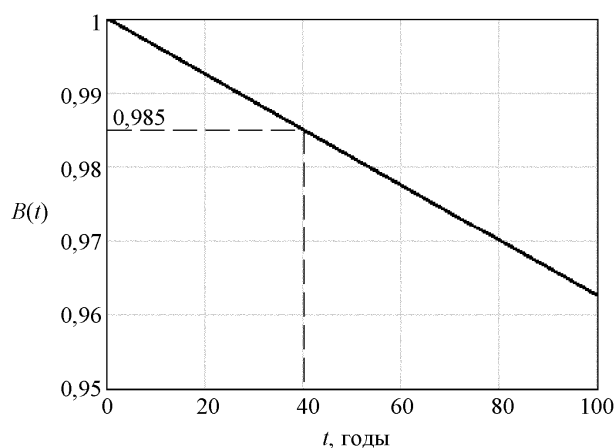


Рисунок 8 – Функция безопасности

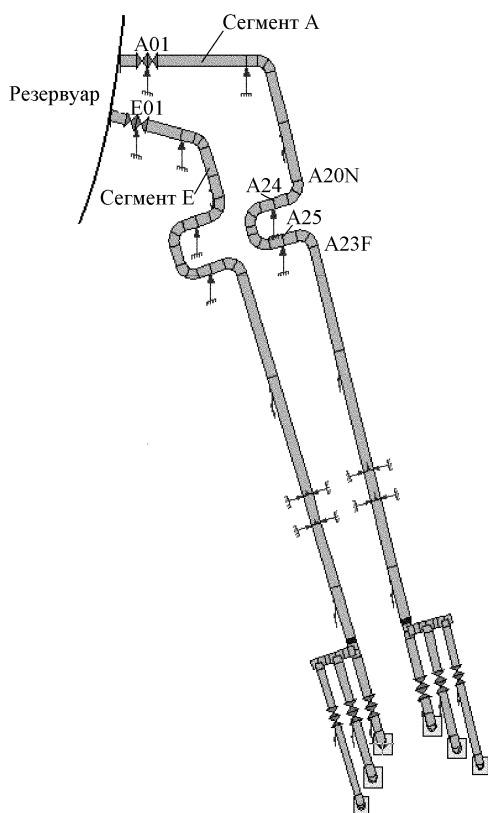


Рисунок 9 – Балочная модель трубопроводных систем

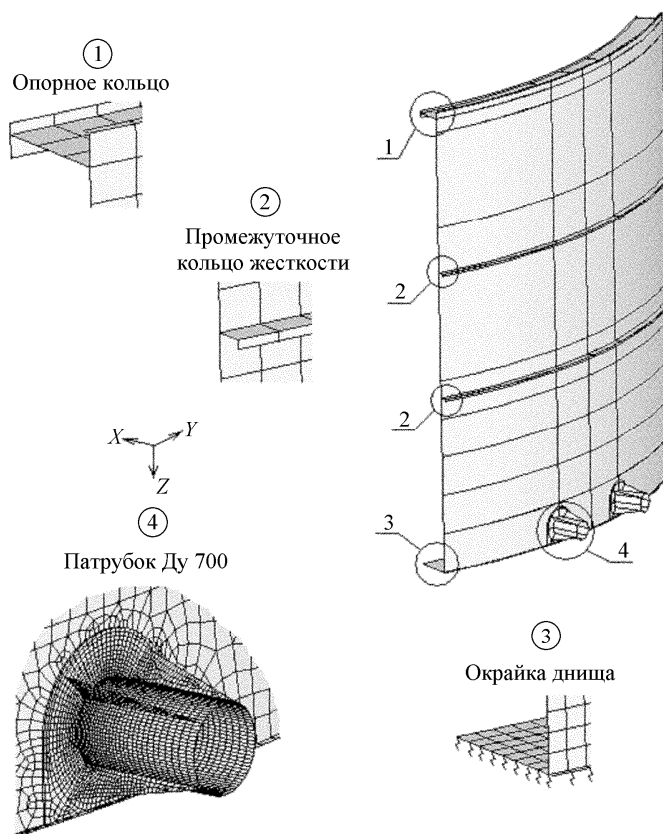


Рисунок 10 – Оболочечная модель резервуара

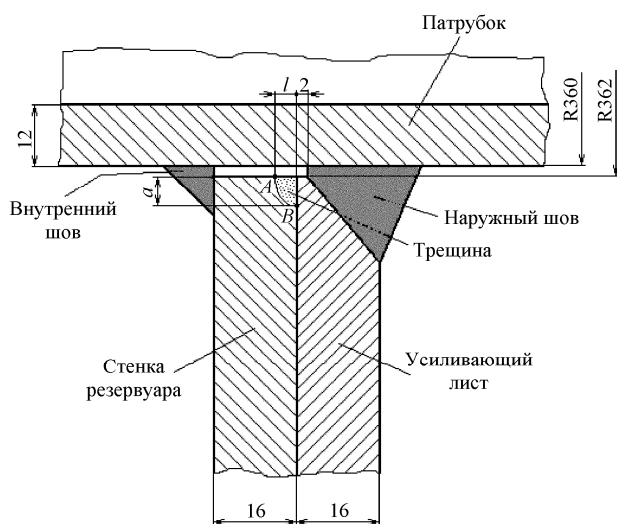


Рисунок 11 – Трещина в стенке резервуара

Предполагается, что в нижней части зоны врезки патрубка (присоединенного к сегменту А) в стенке резервуара имеется наружная четверть-эллиптическая трещина с размерами $l = 4$ мм и $a = 6$ мм (рис. 11).

Следует отметить, что программа ANSYS располагает специальной методикой подмоделирования (sub-modeling), которая обычно используется для получения более детальных результатов в отдельной области модели. Здесь можно сгенерировать независимую подмодель только пред-

ставляющей интерес области, разбив ее более мелкой сеткой конечных элементов, и проанализировать ее отдельно от полной (относительно грубой) модели. В качестве граничных условий для подмодели берются перемещения на границе вырезки, рассчитанные с помощью полной модели. Примечательно то, что «грубая» модель может быть оболочечной (т.е. состоять из конечных элементов оболочки), а подмодель – объемной (т.е. построенной из элементов трехмерного тела).

Для построения подмодели нижней части зоны врезки патрубка в резервуар применяются конечные элементы трехмерного тела SOLID45. При этом идеализация области вблизи трещины осуществляется по методике, описанной в разделе 5, с использованием сингулярных (со смещенными промежуточными узлами) элементов SOLID95. В качестве граничных условий для подмодели здесь берутся перемещения на границе вырезки, рассчитанные с помощью оболочечной модели резервуара (см. рис. 10).

Исследование живучести конструкции резервуара проводится при пульсирующем положительном цикле нагружения ($K_{\min} = 0$, $\Delta K = K_{\max}$). При этом размеры четвертьэллиптической трещины на i -ом шаге интегрирования уравнения скорости роста усталостной трещины определяются по формулам

$$l^{(i)} = l^{(i-1)} + \Delta l^{(i)}; \quad a^{(i)} = a^{(i-1)} + \Delta a^{(i)}, \quad (31)$$

где

$$\Delta l^{(i)} = C \left(K_{IA}^{(i-1)} \right)^m \Delta N^{(i)}; \quad \Delta a^{(i)} = C \left(K_{IB}^{(i-1)} \right)^m \Delta N^{(i)},$$

причем K_{IA} и K_{IB} – значения коэффициента интенсивности напряжений K_I в точках А и В вдоль фронта трещины соответственно.

Предполагается, что исчерпание работоспособности настоящей конструкции происходит в следующих случаях:

- 1) коэффициент интенсивности напряжений K_{IA} или K_{IB} достигает предельного значения K_{fc} (нестабильный рост трещины);

2) глубина трещины l достигает критического значения, равного 80% толщины стенки резервуара (опасность возникновения сквозного дефекта, т.е. нарушения герметичности).

На рис. 12 и 13 приведены зависимости размеров трещины и коэффициентов интенсивности напряжений от числа циклов нагружения. Видно, что нарушение работоспособности резервуара происходит по второму случаю (опасность возникновения сквозного дефекта). При этом живучесть данной конструкции составляет $4,7 \cdot 10^6$ полных циклов нагружения

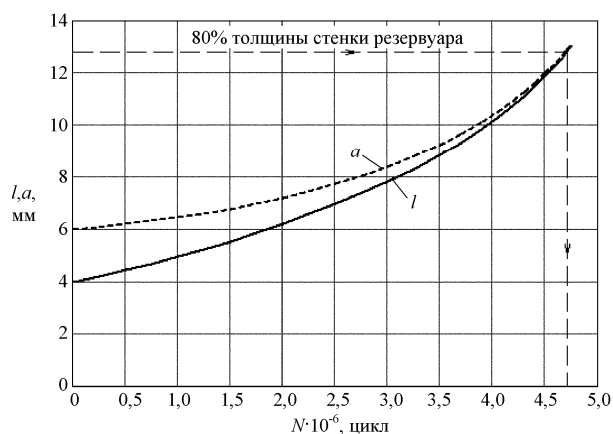


Рисунок 12 – Зависимости размеров трещины от числа циклов

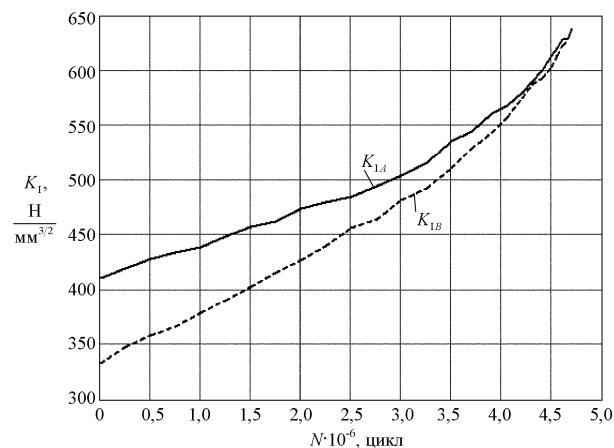


Рисунок 13 – Зависимости коэффициентов интенсивности напряжений от числа циклов

В предположении, что исходные данные являются стохастическими с нормальным законом распределения, можно по формулам (3) и (26) рассчитать функцию надежности. Результаты данного расчета при различных значениях коэффициента вариации \mathcal{G} показаны на рис. 14 ($1 - \mathcal{G} = 0,1$; $2 - \mathcal{G} = 0,15$; $3 - \mathcal{G} = 0,2$). Таким образом, задаваясь значением нормативной надежности H^H по этим графикам можно оценить остаточный ресурс (живучесть) рассматриваемой конструкции резервуара. Например, при $H^H = 0,99$ и $\mathcal{G} = 0,15$ живучесть составляет $4,4 \cdot 10^6$ полных циклов.

В качестве последнего примера проводится оценка живучести и надежности надземной трубопроводной системы при наличии поверхностной трещины в зоне температурного компенсатора. Рассматривается температурный компенсатор (труба $720 \times 12,5$), расположенный между точками А20N и А23F надземного трубопровода, присоединенного к резервуару (см. рис. 9). Нагрузки, действующие на температурный компенсатор со стороны трубопровода, здесь также можно определить с помощью балочной ко-

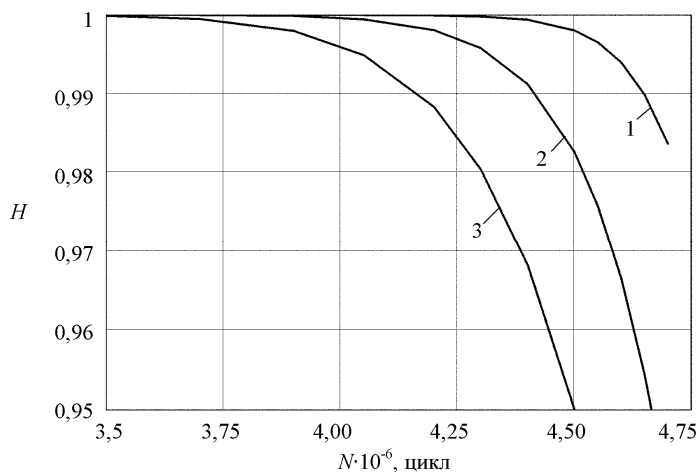


Рисунок 14 – Функция надежности для резервуара

нечно-элементной модели, построенной в программе AutoPIPE.

Для идеализации температурного компенсатора в программе ANSYS используются конечные элементы оболочки SHELL63 (рис. 15). Для приложения нагрузок (в виде перемещений) со стороны трубопровода в центре каждого концевое сечения компенсатора определяется узел, связанный с узлами оболочки с помощью элементов жесткой балки MPC184.

Предполагается, что в верхней части компенсатора (см. рис. 15) в стенке трубы имеется наружная осевая полуэллиптическая трещина со следующими размерами: глубина $l = 3$ мм; половина длины $a = 5$ мм (рис. 16).

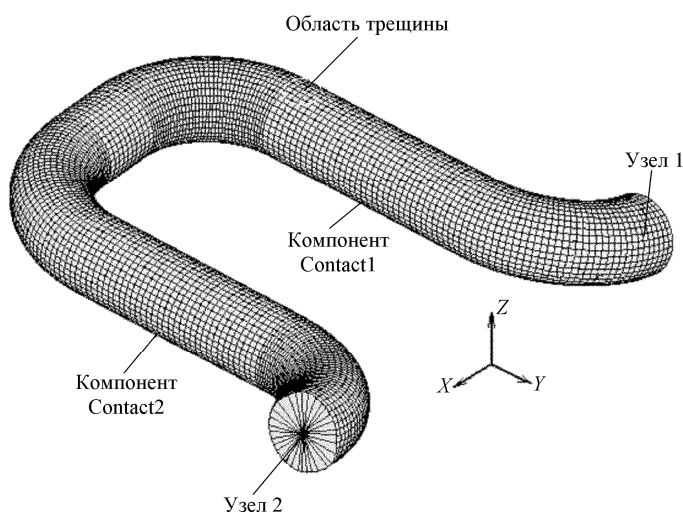


Рисунок 15 – Оболочечная модель температурного компенсатора

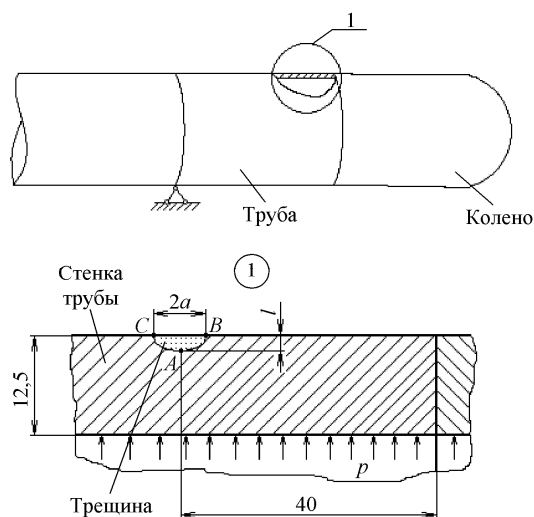


Рисунок 16 – Трещина в стенке компенсатора

Следуя методике подмоделирования, в верхней части трубы вырезается стенка с трещиной, расположенной приблизительно в середине выделенной зоны. При этом граница вырезки должна быть достаточно удалена от области концентрации напряжений (т.е. от трещины). Для построения данной подмодели здесь также применяются элементы трехмерного тела SOLID45, а вокруг фронта трещины – сингулярные элементы SOLID95 со смещенными узлами. В качестве граничных условий берутся перемещения, рассчитанные с помощью оболочечной модели компенсатора.

Результаты численного интегрирования закона распространения трещины при усталости приведены на рис. 17 и 18 в виде зависимостей размеров дефекта и коэффициентов интенсивности напряжений от числа циклов нагружения.

Видно, что нарушение работоспособности температурного компенсатора здесь также происходит по второму случаю (опасность возникновения сквозного дефекта). При этом живучесть данной системы составляет $6,9 \cdot 10^7$ полных циклов нагружения.

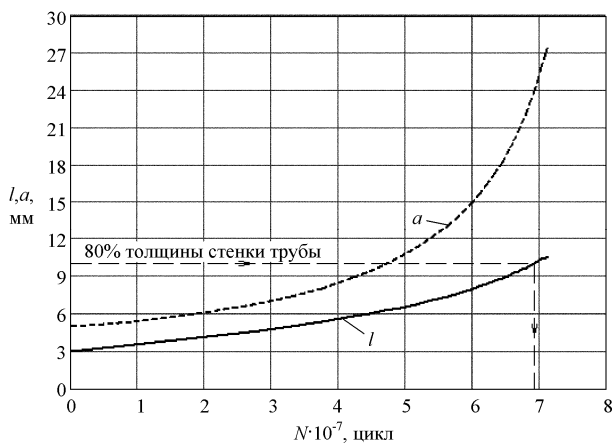


Рисунок 17 – Зависимости размеров трещины от числа циклов

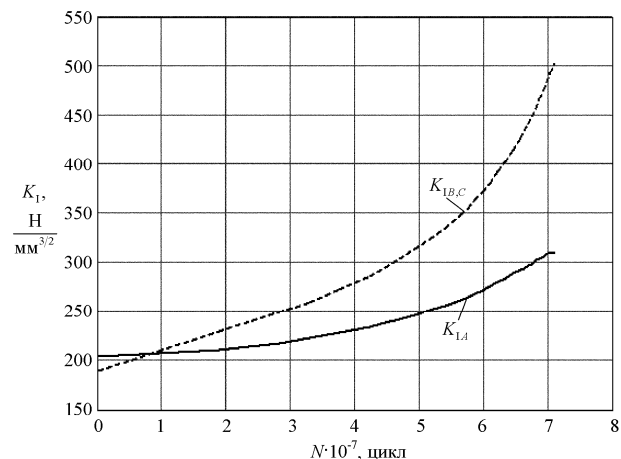


Рисунок 18 – Зависимости коэффициентов интенсивности напряжений от числа циклов

Результаты расчета функции надежности представлены на рис. 19 (1 – $\mathcal{Q} = 0,1$; 2 – $\mathcal{Q} = 0,15$; 3 – $\mathcal{Q} = 0,2$). Как видно из графиков, при нормативной надежности $H^H = 0,99$ и коэффициенте вариации $\mathcal{Q} = 0,15$ живучесть составляет $6,95 \cdot 10^7$ полных циклов.

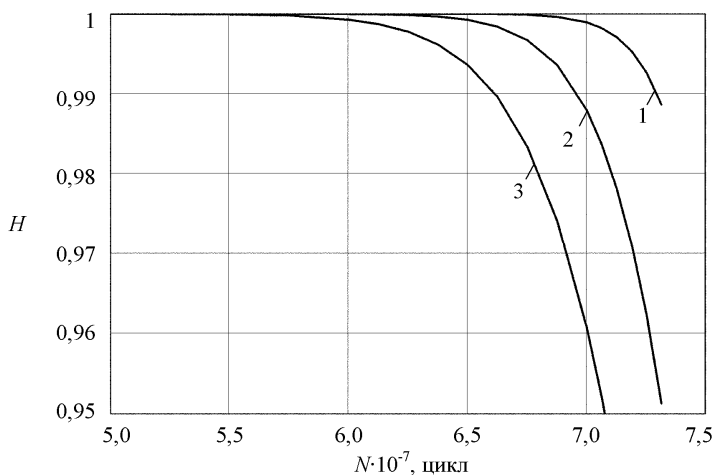


Рисунок 19 – Функция надежности для компенсатора

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное хозяйственное и экономическое значение для повышения надежности, ресурса и безопасности современных продуктопроводов за счет создания, развития и совершенствования научных методов комплексной количественной оценки и анализа показателей надежности трубопроводных систем при их проектировании и эксплуатации на основе математического моделирования процессов изменения параметров качества силовых элементов при случайных нагрузках.

В ходе диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика комплексной оценки основного количественного показателя надежности элементов трубопроводных систем – вероятности безотказной работы – с учетом стохастического характера эксплуатационных нагрузок и рассеивания характеристик трещиностойкости и прочности элемен-

тов конструкций. Предложенный подход основан на общей теории надежности, моделировании поведения трубопроводных систем при случайных внешних нагрузках и позволяет проводить расчеты трубопроводов, в состав которых входят тонкостенные элементы, не допускающие эксплуатацию с трещинами, и элементы, допускающие эксплуатацию с развивающимися трещиноподобными дефектами. Доведенная до практических приложений методика учитывает возможность появления двух видов отказа – внезапного и постепенного – в каждом элементе трубопровода и является эффективным средством сравнения предлагаемых проектных решений новых трубопроводов и оценки остаточного ресурса, живучести и долговечности используемых продуктопроводов по результатам инструментальных диагностических исследований их состояния.

2. Предложена и доведена до практического применения основанная на использовании метода интерполяционных полиномов методика моделирования реализаций случайных процессов изменения эксплуатационных факторов (включая внешние нагрузки) со сложной структурой, что позволило легко алгоритмизировать и в несколько раз снизить время и трудоемкость вычислений при решении задач статистической динамики численными методами на этапе проектирования широкого класса сложных технических систем различного назначения.

3. Средствами вычислительной математики обоснован выбор метода интерполяционных полиномов для определения вероятностных характеристик НДС участков нефтегазопроводов по входным вероятностным характеристикам силовых воздействий и несущей способности конструкции, позволивший по сравнению с методом Монте-Карло в десять раз сократить необходимое число расчетов и снизить трудоемкость, сохраняя при этом требуемую точность получаемых результатов. Эффективность интерполяционного метода получила подтверждение при вычислении показателей надежности реального трубопровода в зоне его перехода через водное препятствие.

4. На основе теории подобия усталостного разрушения разработаны и апробированы процедуры расчета и использования параметров кривых усталости конструктивных элементов по образованию первых макротрещин с заданной вероятностью для количественной оценки надежности элементов при постепенном отказе. Эти исследования на фактическом материале доказали возможность исключения необходимости проведения дорогостоящих экспериментальных исследований усталостных свойств трубных сталей, ограничиваясь усталостными испытаниями стандартных лабораторных образцов одного типоразмера.

5. На основе нормативного вероятностного подхода впервые предложена схема и разработана методика комплексной оценки надежности переходов подземных участков нефтегазопроводов через сейсмические разломы, включающая детерминированные расчеты, решение задачи статистической динамики методом интерполяционных полиномов и вычисление функций безопасности и риска, необходимых для нормирования надежности и обоснования выбора безопасных проектных решений при сейсмическом воздействии. Проведенный анализ вероятности безотказной работы реального газопровода в зоне сейсмиче-

ского разлома показал, что общепринятый расчет работоспособности подземных трубопроводов в зоне сейсмического разлома в детерминированной постановке приводит к завышенным значениям коэффициентов запаса по отдельным критериям разрушения. Поэтому для исследования работоспособности трубопроводов в зоне разлома необходимо учитывать статистический разброс параметров сейсмических смещений, механических характеристик используемых материалов и геометрических параметров поперечного сечения. Установлено, что существенное влияние на достоверность получаемых результатов оказывает информация о статистических характеристиках сейсмических смещений, поэтому требуется отлаженная система сбора и обработки статистической информации о геоморфологических условиях вдоль трассы.

6. В результате анализа значений коэффициента интенсивности напряжений для поверхностных трещин различных размеров, полученных с помощью МКЭ-пакета ANSYS, предложены безразмерные поправочные коэффициенты в формулах расчета коэффициентов интенсивности напряжений для осевой и окружной трещин в трубах, использование которых существенно упрощает проведение оценочных вычислений на стадии проектирования.

7. На основе численного моделирования процесса роста поверхностных трещин с помощью метода конечных элементов и метода интерполяционных полиномов впервые предложен расчетный метод оценки надежности силовых элементов нефтегазопроводов, практическое применение которого позволило оценить остаточную долговечность элементов реальной трубопроводной системы и дать заключение о необходимости ремонта либо о продлении ресурса. Положительные результаты дают возможность распространения метода на проектные и эксплуатирующие предприятия отрасли.

8. Получены результаты количественной оценки живучести и надежности резервуара для нефти в зоне врезки патрубка и температурного компенсатора надземного трубопровода по разработанным методикам. На конкретных примерах решены сложные задачи моделирования процессов роста трещиноподобных дефектов при циклических нагрузках. Рассчитанные зависимости позволили оценить остаточный ресурс конструкции по величине нормативной надежности и назначить периодичность технического обслуживания и ремонтов.

Представленные в работе методики, процедуры, алгоритмы и рекомендации использованы в практике проектирования магистральных трубопроводов и трубопроводных систем в Открытом акционерном обществе «Институт по проектированию и исследовательским работам в нефтяной промышленности» (ОАО «Институт Гипрвостокнефть») и на Государственном унитарном предприятии «Институт проблем транспорта энергоресурсов».

Предложенная методика комплексной оценки показателей надежности трубопроводных систем может использоваться при доработке нормативной документации проектирования продуктопроводов для экстремальных условий эксплуатации с учетом современных требований по обеспечению безопасности и снижению риска катастрофических разрушений.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

в монографии:

1. Перов С.Н. Обеспечение надежности трубопроводных систем: монография / С.Н. Перов, С.И. Аграфенин, Ю.В. Скворцов, Ю.Л. Тарасов. – Самара: ООО «Изд-во СНЦ», 2008. – 246 с.

из перечня ведущих научных рецензируемых журналов и изданий, в которых по рекомендации Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук:

2. Тарасов Ю.Л. Методика оценки вероятности безотказной работы трубопроводных систем / Ю.Л. Тарасов, С.Н. Перов, С.Л. Логвинов // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2003. – № 1(3). – С. 111-119.

3. Перов С.Н. Решение задачи статистической динамики для магистрального нефтепровода / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов, К.А. Цапурин // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 187-193.

4. Перов С.Н. Оценка безопасности перехода подземного трубопровода через сейсмический разлом / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов, С.И. Аграфенин // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2007. – № 2(13). – С. 141-150.

5. Перов С.Н. Коэффициенты интенсивности напряжений для труб с несквозными трещинами / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов, К.А. Цапурин // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2008. – Т. 10, № 3(25). – С. 905-910.

6. Перов С.Н. Оценка надежности трубопроводных систем с трещинами при постепенном отказе / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов // Вестник Самар. гос. ун-та. – 2008. – № 8/2 (76). – С. 5-16.

7. Перов С.Н. Представление случайных процессов с помощью неканонического разложения / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2008. – № 1(14). – С. 226-235.

8. Перов С.Н. Исследования живучести резервуара при наличии поверхностной трещины в зоне врезки патрубка / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов // Вестник Казан. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 1. – С. 28-30.

в других изданиях:

9. Аграфенин С.И. Анализ целесообразности использования статистических подходов к оценке проектных решений (на примере перехода подземного трубопровода через сейсмический разлом) / С.И. Аграфенин, С.Н. Перов // Обустройство и инфраструктура месторождений: Труды Первой межд. практ. конф. (17-18 февраля 2005 г.). – Москва, 2005. – С. 41-46.

10. Аграфенин С.И. Использование статистических подходов к оценке надежности магистральных трубопроводов / С.И. Аграфенин, С.Н. Перов, М.Х. Султанов // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: Матер. научн.-практ. конф. (21 мая 2008 г.). – Уфа, 2008. – С. 139-140.

11. Аграфенин С.И. Методология обеспечения надежности трубопроводных систем при их проектировании / С.И. Аграфенин, С.Н. Перов // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 11. – С. 112-116.

12. Аграфенин С.И. Решение задачи статистической динамики для трубопроводов в зоне сейсмического излома / С.И. Аграфенин, С.Н. Перов, М.Х. Султанов // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: Матер. научн.-практ. конф. (21 мая 2008 г.). – Уфа, 2008. – С. 141-142.

13. Гадалин Н.И. Исследование возможности неканонического разложения стационарных случайных процессов со сложным спектром / Н.И. Гадалин, Э.И. Миноранский, С.Н. Перов // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев, 1986. – С. 108-115.

14. Дуплякин В.М. Исследование усталостного разрушения образцов сложной формы из материала IX18H9T / В.М. Дуплякин, С.Н. Перов // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев, 1983. – С. 98-103.

15. Дуплякин В.М. Оценка прочности и надежности силовых элементов КЛА при воздействии температурных факторов: Методические указания / В.М. Дуплякин, С.Н. Перов. – М: ВНИИСОТ, 1991. – 69 с.

16. Исследование трещиностойкости конструкционных материалов в вакууме и при пониженных температурах / В.К. Шадрин, С.Н. Перов; Куйбышев. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1985. – 55 с. – Деп. в ВИНТИ 25.03.85, № 2079-85.

17. Конечно-элементное моделирование трещин и вычисление параметров механики разрушения / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов, К.А. Цапурин; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2006. – 24 с. – Деп. в ВИНТИ 02.03.2006, № 218-B2006.

18. Методика оценки вероятности безотказной работы элементов конструкции л. а. с учетом технологических и эксплуатационных трещиноподобных дефектов / С.Н. Перов; Куйбышев. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1985. – 77 с. – Деп. в ВИНТИ 03.06.85, № 3853-85.

19. Обоснование статистических методов оценки надежности магистральных трубопроводов на этапе проектирования: Отчет о НИР (заключ.) / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; рук. Тарасов Ю.Л.; исполн.: Перов С.Н., Скворцов Ю.В. [и др.]. – Самара, 2005. – 134 с. – Библиогр.: с. 134. – №ГР 01200507428.

20. Оценка надежности трубопроводных систем в сложных условиях эксплуатации: Отчет о НИР (заключ.) / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; рук. Тарасов Ю.Л.; исполн.: Перов С.Н., Скворцов Ю.В. [и др.]. – Самара, 2007. – 157 с. – Библиогр.: с. 147-157. – №ГР 01200710145.

21. Оценка остаточного ресурса элементов конструкции, имеющих производственные или эксплуатационные дефекты / Т.Д. Коваленко, Э.И. Миноранский, С.Н. Перов, Ю.Л. Тарасов // Вопросы прочности и долговечности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев, 1986. – С. 95-102.

22. Оценка работоспособности трубопроводных систем при наличии трещиноподобных дефектов с учетом реальных условий эксплуатации: Отчет о НИР (заключ.) / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; рук. Тарасов Ю.Л.; исполн.: Перов

С.Н., Скворцов Ю.В. [и др.]. – Самара, 2006. – 120 с. – Библиогр.: с. 118-120. – №ГР 01200609272.

23. Перов С.Н. Вычисление коэффициентов интенсивности напряжений для труб с поверхностными трещинами / С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов, К.А. Цапурин // Наука и технологии: Труды XXVI Российской школы. – М.: РАН, 2006. – Т. 1. – С. 274-281.

24. Перов С.Н. Моделирование роста усталостной трещины при случайном нагружении / С.Н. Перов, М.В. Яхин // Рыночная экономика: состояние, проблемы, перспективы: Сб. науч. трудов. – Самара: ИПО СГАУ, 1998. – Вып. 2. – С. 462-468.

25. Перов С.Н. Обеспечение прочностной надежности элементов конструкции на этапе проектирования / С.Н. Перов, Ю.Л. Тарасов // Нормирование прочности и ресурса высоконагруженных машин: Труды всесоюзн. науч.-техн. симпозиума. – Владимир, 1986. – С. 186-190.

26. Перов С.Н. Статистический анализ надежности магистрального трубопровода в зоне сейсмического разлома / С.Н. Перов, Ю.Л. Тарасов, С.Л. Логвинов // Надежность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта: Труды II Всерос. науч.-практ. конф. (17-19 мая 2005 г.). – Самара, 2005. – С. 99-104.

27. Прохоров А.Г. Влияние перегрузок напряжений на долговечность конструктивного элемента / А.Г. Прохоров, А.С. Мостовой, С.Н. Перов // Проблемы прочности. – 1982. – № 4. – С. 64-70.

28. Статистический анализ перехода подземного трубопровода через сейсмический разлом / С.Л. Логвинов, С.Н. Перов, Ю.В. Скворцов; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2005. – 42 с. – Деп. в ВИНТИ 25.05.2005, № 747-В2005.

29. Статистический расчет кривых усталости по образованию первых макротрещин в опасных сечениях произвольной конфигурации / В.М. Дуплякин, С.Н. Перов; Куйбышев. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1983. – 46 с. – Деп. в ВИНТИ 27.09.83, № 4739-83.

30. Тарасов Ю.Л. Вероятностные характеристики несущей способности магистральных трубопроводов / Ю.Л. Тарасов, С.Н. Перов, С.М. Савинов // Надежность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта: Труды II Всерос. науч.-практ. конф. (17-19 мая 2005 г.). – Самара, 2005. – С. 161-166.

31. Тарасов Ю.Л. Конструктивно-технологические средства обеспечения надежности и ресурса трубопроводных систем / Ю.Л. Тарасов, С.Н. Перов // Надежность и экологическая безопасность трубопроводного транспорта: Труды II Всерос. науч.-практ. конф. (17-19 мая 2005 г.). – Самара, 2005. – С. 148-161.

32. Тарасов Ю.Л. Проблема оценки надежности трубопроводных систем при их проектировании / Ю.Л. Тарасов, С.Н. Перов, С.Л. Логвинов // Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин: Сб. трудов межд. науч.-техн. конф. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – С. 244-248.

33. Тарасов Ю.Л. Прогнозирование надежности конструкций по критерию усталостного повреждения / Ю.Л. Тарасов, Э.И. Миноранский, С.Н. Перов

// Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев: Наук. думка, 1984. – Вып. 6. – С. 91-96.

34. Тарасов Ю.Л. Схема оценки надежности элементов конструкции летательного аппарата при постепенных и внезапных отказах / Ю.Л. Тарасов, Э.И. Миноранский, С.Н. Перов // Прочность и долговечность элементов конструкций л.а. – Куйбышев, 1984. – С. 83-92.

35. Corrosion fatigue and stress corrosion cracking of AZ91E-T6 cast magnesium alloy in 35%NaCl solution / R.I. Stephens, C.D. Shrader, D.L. Goodenberger, S.N. Perov [et al.] // International Congress and Exposition: SAE Technical Paper Series 930752 (March 1-5, 1993). – Detroit, Michigan, 1993.

36. Dupliakin V.M. Extreme value statistics application to fatigue cracks initiation modeling / V.M. Dupliakin, T.D. Kovalenko, S.N. Perov // Eight International Conference on Fracture: Collection of Abstracts (June 8-14, 1993). – Kiev, 1993. – Pt. 1. – P. 159.

37. Ogarevic V.V. Application and verification of fatigue life calculation methods for AZ91E-T6 cast magnesium alloy under variable amplitude loading / V.V. Ogarevic, R.I. Stephens, S.N. Perov // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1993. – V.115. – P. 385-390.

38. Perov S.N. System of responding to and management of elimination of emergency situations aftermaths / S.N. Perov // The Role of Local Governments in Reducing the Risk of Disasters (April 28 – May 2, 2003). – Istanbul (Turkey): Marmara University, 2003.